

**CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA MICROCUENCA DEL
RIO SUNUBA EN EL MUNICIPIO DE GUAYATÁ BOYACÁ**

KAREN LIYED GONZALEZ LOPEZ

COD. 560427

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2018

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., Noviembre de 2018.



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Dedicatoria

Dedico este proyecto de investigación a Dios mi compañero de vida y guía en todo momento, a mis padres por quienes me levanto todos los días, celebran mis logros y quienes confiaron en mis capacidades y habilidades para desarrollarlo.

Agradecimientos

Este proyecto de grado fue posible gracias al apoyo del profesor Alberto Pardo, a quien le agradezco por compartir conmigo sus conocimientos, proporcionarme los instrumentos necesarios para la elaboración del mismo y confiar en mí en todo momento.

A toda mi familia quienes con su apoyo me dieron fuerza para seguir adelante, me alentaron en los momentos donde decaí, nunca dudaron de mi capacidad para realizar este proyecto y siempre confiaron en que lo lograría con éxito.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO	12
1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2.1 <i>Antecedentes del problema</i>	12
1.2.2 <i>Pregunta de investigación</i>	14
1.3 JUSTIFICACIÓN	16
1.4 OBJETIVOS	18
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	18
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	18
2 MARCOS DE REFERENCIA	19
2.1 MARCO CONCEPTUAL	19
2.2 MARCO TEÓRICO	20
2.3 MARCO JURÍDICO.....	20
2.4 MARCO GEOGRÁFICO.....	21
2.5 ESTADO DEL ARTE	21
3 METODOLOGÍA.....	29
3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO	29
3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS	29

3.2.1	<i>Balance Hídrico Agrícola</i>	29
3.2.1.1	Uso consuntivo del agua.....	30
3.2.1.2	Precipitación Efectiva.....	31
3.2.1.3	Coeficiente de infiltración	31
3.2.1.4	Riego Bruto	31
3.2.1.5	Efectividad de Riego	32
3.2.2	<i>Ecuación de Budyko</i>	32
3.2.3	<i>Ecuación de Turc</i>	33
3.2.4	<i>Metodología para el cálculo de la huella hídrica verde</i>	33
3.2.5	<i>Metodología para el cálculo de la huella hídrica azul</i>	34
3.2.6	<i>Metodología para calcular la huella hídrica gris</i>	34
3.2.7	<i>Cálculo de la huella hídrica total</i>	35
4	RESULTADOS	36
4.1	CARCTERIZACIÓN MICROCUENCA RIO SUNUBA	36
4.1.1	<i>Cobertura Vegetal</i>	36
4.1.2	<i>Hidrología</i>	37
4.1.3	<i>Estaciones</i>	37
4.1.4	<i>Red de Calidad Hídrica</i>	38
4.2	CÁLCULO DE LAHUELLA HÍDRICA.....	40
4.2.1	<i>Obtención de la Información Hidrometereológica</i>	41
4.2.1	<i>Sector Agrícola</i>	42
4.2.1.9	Cálculo de la huella hídrica verde.....	51
4.2.1.10	Cálculo de la huella hídrica Azul.....	57
4.2.1.11	Cálculo de la huella hídrica Gris.....	61
4.2.1.12	Cálculo de la huella hídrica TOTAL	62
4.2.2	<i>Sector Doméstico</i>	64
4.3	ESTRATEGIAS DE MEJORA.....	65
4.3.1	<i>Sector Agrícola</i>	65

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. MICROCUECA RÍO SUNUBA	15
ILUSTRACIÓN 2. COBERTURA VEGETAL	36
ILUSTRACIÓN 3. FUENTES HÍDRICAS	37
ILUSTRACIÓN 4. CAPTACIONES SECTOR DOMÉSTICO	39
ILUSTRACIÓN 5. VERTIMIENTOS	40

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. CORRELACIÓN PARA CONDICIONES NORMALES	27
GRÁFICO 2. DISTRIBUCIÓN HH AZUL.....	27
GRÁFICO 3. DISTRIBUCIÓN HH GRIS.....	28
GRÁFICO 4. CORRELACIÓN PARA CONDICIONES NORMALES	46
GRÁFICO 5. CORRELACIÓN ENTRE ETP Y ELEVACIÓN	48
GRÁFICO 6. HUELLA HÍDRICA OBTENIDA.....	65

LISTA DE TABLAS

<i>TABLA 1. HUELLA HÍDRICA POR SECTORES.....</i>	<i>22</i>
<i>TABLA 2. HUELLA HÍDRICA.....</i>	<i>23</i>
<i>TABLA 3. INDICADORES DE EFICIENCIA FÍSICA, SOCIAL Y DE PRODUCTIVIDAD</i>	<i>24</i>
<i>TABLA 4. HUELLA HÍDRICA AZUL.....</i>	<i>25</i>
<i>TABLA 5. EVALUACIÓN HUELLA HÍDRICA 2007 Y 2008</i>	<i>26</i>
<i>TABLA 6. EVALUACIÓN HUELLA HÍDRICA 2009 Y 2010</i>	<i>26</i>
<i>TABLA 7. HUELLA HÍDRICA</i>	<i>27</i>
TABLA 8. DATOS DE TEMPERATURA MULTIANUAL POR ESTACIONES	42
TABLA 9. DATOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL POR ESTACIONES	42
TABLA 10. DATOS DE PRECIPITACIÓN OBTENIDOS DEL MODELO SCS.....	43
TABLA 11. VALORES DE TEMPERATURA EN CONDICIONES NORMALES	43

TABLA 12. VALORES PARA EL AÑO SECO 2014	44
TABLA 13. VALORES PARA EL AÑO SECO 2015	44
TABLA 14. VALORES PARA EL AÑO HÚMEDO 2010	44
TABLA 15. VALORES PARA EL AÑO HÚMEDO 2011	44
TABLA 16. VALORES DE TEMPERATURA REAL PARA EL AÑO SECO 2014	45
TABLA 17. VALORES DE TEMPERATURA REAL PARA EL AÑO SECO 2015	45
TABLA 18. VALORES DE TEMPERATURA REAL PARA EL AÑO HÚMEDO 2010	45
TABLA 19. VALORES DE TEMPERATURA REAL PARA EL AÑO 2011	45
TABLA 20. VALORES DE ETR PARA EL AÑO SECO 2014	47
TABLA 21. VALORES DE ETR PARA EL AÑO SECO 2015	47
TABLA 22. VALORES DE ETR PARA EL AÑO HÚMEDO 2010	47
TABLA 23 VALORES DE ETR PARA EL AÑO 2011	47
TABLA 24. VALORES DE ETP PARA EL AÑO SECO 2014.....	48
TABLA 25. VALORES DE ETP PARA EL AÑO HÚMEDO 2010.....	49
TABLA 26. VALORES DE ETP PARA EL AÑO SECO 2015.....	49
TABLA 27. VALORES DE ETP PARA EL AÑO HÚMEDO 2011.....	49
TABLA 28. VALORES DE Ke	50
TABLA 29. BALANCE HÍDRICO AGRÍCOLA EN CONDICIONES NORMALES PARA LA FASE DE COSECHA	52
TABLA 30. BALANCE HÍDRICO AGRÍCOLA EN CONDICIONES NORMALES PARA LA FASE DE SEMILLERO Y ALMÁCIGO .	52
TABLA 31. VALORES MENSUALES DE AGUA VERDE EN LA FASE DE SEMILLERO Y ALMÁCIGO PARA CONDICIONES NORMALES	53
TABLA 32. VALORES MENSUALES DE AGUA VERDE EN LA FASE COSECHA PARA CONDICIONES NORMALES	54
TABLA 33. VALORES MENSUALES DE AGUA AZUL EN LA FASE DE SEMILLERO Y ALMÁCIGO.....	58
TABLA 34. HUELLAS HÍDRICAS TOTALES.....	64
TABLA 35. CONSUMO DE AGUA SECTOR DOMÉSTICO.....	64

RESUMEN

El trabajo de investigación presentado se realizó con el fin de fortalecer el conocimiento sobre la gestión integral del recurso hídrico a nivel multisectorial por medio de la cuantificación de la huella hídrica en un cultivo específico al ser éste un sector en crecimiento con un potencial de desarrollo de gran importancia para la economía local y del país.

Las diferentes metodologías existentes para cuantificar esta huella fueron estudiadas a detalle con el propósito de determinar aquella que se ajuste más a las condiciones de este proyecto.

Al implementar dicha tecnología y obtener los resultados correspondientes al consumo de agua real que actualmente se presenta en la zona de estudio, permitirá aumentar las investigaciones a nivel local y nacional sobre este tema y utilizar el proyecto como medida de prevención, mitigación y corrección ante los posibles problemas con el uso de la misma en sectores productivos.

Palabras clave: Recurso Hídrico, sectores productivos, huella hídrica.

ABSTRACT

The research work presented was carried out in order to strengthen the knowledge on the integral management of water resources at a multisectoral level through the quantification of the water footprint in a specific crop in the sector, a growing sector with a potential for development of great importance for the local economy and the country. The different existing methodologies to quantify this footprint were studied in detail in order to determine which best fits the conditions of this project.

By implementing this technology and obtaining the results corresponding to the actual water consumption that is currently present in the study area, increase research at the local and national level on this subject and use the project as a measure of prevention, mitigation and correction before the possible problems with the use of it in productive sectors

Keywords: Water Resources, productive sectors, water footprint.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolló en el municipio de Guayatá, Boyacá, caracterizado por su rica biodiversidad y gran producción agrícola, siendo el café su producto pionero. El propósito de este proyecto es cuantificar la huella hídrica con el fin de fortalecer el conocimiento sobre el adecuado uso del agua y por ende mejorar su productividad. Por lo tanto, fueron analizadas diversas metodologías que fuesen óptimas para cumplir con dicho propósito.

Algunos de los autores consultados fue el profesor Aren Hoekstra, quien introdujo el concepto de huella hídrica por primera vez además de diferentes estudios realizados en otros lugares del mundo, los cuales fueron de gran importancia para el desarrollo del trabajo. Dentro de estos trabajos, fue posible determinar que el cálculo de la huella hídrica permite conocer el consumo real de agua que se presenta en un proceso y así mismo saber cómo mitigar los posibles problemas generados por ello. La metodología más utilizada es *“The water footprint assessment manual”* desarrollado por la UNESCO, bajo la dirección del profesor Hoekstra.

Uno de los limitantes presentados durante el desarrollo de la investigación, fue la falta de documentación aprobada sobre la temática de huella hídrica, pues actualmente existen muy pocos estudios relacionados con este tipo de temas, y más específicamente hay muy poca investigación sobre el consumo de agua a nivel multisectorial. Sin embargo, la información encontrada es una base fundamental para el desarrollo exitoso del proyecto.

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Según el contexto en el que se da el presente proyecto, la línea de investigación a la cual corresponde es “Saneamiento de Comunidades”, ya que el cálculo del consumo real de agua en la micro cuenca del río Sunuba, este se encuentra estrechamente relacionado con dicha línea.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Antecedentes del problema

El concepto de huella hídrica viene tratándose a nivel mundial desde principios del siglo XXI, específicamente en el año 2002 cuando UNESCO – IHE (IHE Delft Institute for Water Education), propone este nuevo concepto como un indicador que determina el uso del agua. A partir de ese año, el instituto se encargó de refinar el concepto y los métodos de cuantificación utilizados para el cálculo de la huella dando como resultado el informe general en 2004 llamado “Huella Hídrica de las Naciones”, cuyo objetivo fue calcular la huella hídrica de cada nación para el periodo de 1997 a 2001, basado principalmente en 3 tipos de usos: uso doméstico, agrícola e industrial. La metodología utilizada por este estudio se desarrolla calculando de antemano el volumen total de agua necesario de manera directa o indirecta en la producción de bienes y servicios de cada país; es importante tener en cuenta que la cobertura de agua nacional se divide en: uso interno y uso externo, es decir, el primero hace referencia al consumo del país y el externo aquel recurso que es exportado. Teniendo calculado este volumen ya es posible comenzar con el desarrollo de la huella hídrica de una nación (A.Y. Hoekstra, 2004).

En el año 2008 y tras el auge en el mundo sobre la importancia de cuantificar el uso del agua y la manera en la que el consumo actual de este recurso afecta de manera directa el medio ambiente y su estabilidad, nuevamente el profesor Aren Hoekstra, encargado de introducir el concepto de huella hídrica por medio de las investigaciones realizadas en el IHE (Institute of Water Corporation) explicadas en el párrafo anterior, quien junto con los principales actores del sector empresarial mundial, la sociedad civil, diferentes organizaciones y la academia, fundaron la Red de la Huella de Agua (*Water Footprint Network*) con el fin de mostrarle a todos lo importante de evaluar el uso de agua para aportar alternativas de solución a la problemática actual (University of Twente; WWF; UNESCO-IHE; World Business Council for Sustainable Development; International Finance Corporation; Netherlands Water Partnership; Water Neutral Foundation, 2015)

En el contexto Colombiano, uno de los primeros estudios con mayor relevancia en el país con respecto al uso del agua se desarrolló durante el año 2009 como proyecto piloto entre Suizagua Colombia y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, con el fin de incentivar temas de huella hídrica en el sector empresarial, comenzando con las compañías suizas establecidas en el país. En el año 2012 los esfuerzos se extienden y varias compañías colombianas comienzan a realizar sus respectivas huellas hídricas como estrategia para fortalecer sus programas de sostenibilidad y responsabilidad ambiental (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia CTA, COSUDE , 2013). A raíz del éxito en la gestión de dicho proyecto piloto, se desarrolló una segunda fase del mismo donde la orientación no se dirigía únicamente al sector empresarial, sino en este caso el cálculo de la huella hídrica se realizó para el área biogeográfica del país, centrándose en el sector agrícola del mismo; se priorizaron 21 subcuentas estratégicas alrededor del territorio para elaborar la huella (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia CTA, COSUDE , 2013).

Otro de los logros alcanzados por la alianza entre COSUDE y CTA, fue la evaluación de la huella hídrica en la Cuenca del río Porce en el año 2013, como respuesta a la necesidad de avanzar en las investigaciones sobre el uso del agua en los sectores productivos, por lo tanto a partir de los resultados nacionales obtenidos de la huella hídrica agrícola realizada con anterioridad se llegó a la conclusión de que la Cuenca del Río Porce es prioritaria para la economía y sostenibilidad de la nación. Este estudio se llevó a cabo utilizando la metodología descrita en *The water footprint assessment manual*, un manual diseñado por Aren Hoekstra donde se ilustra un conjunto de métodos para contabilizar esta huella, en sectores productivos, empresariales, a nivel nacional, global y hasta para el consumidor (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia CTA, COSUDE , 2013).

Uno de los últimos estudios realizados en Colombia sobre el uso del agua, fue la presentación durante el mes de Mayo en 2015, del Estudio Nacional del Agua 2014, donde se calculó la huella hídrica nacional en base a los tres tipos de agua: verde, azul y gris con el fin de cuantificar el consumo de agua en el sector productivo del país así como el fortalecimiento del estudio. Este tipo de investigación permitió generar una conciencia sobre el uso del agua y la oportunidad de proponer alternativas de solución para la gestión del recurso hídrico actualmente (IDEAM, 2014).

Desde la academia también se han realizado diversos proyectos de investigación relacionados con la cuantificación de la huella hídrica para el sector agrícola, una de estos fue desarrollada por el ingeniero Jhon Alejandro Zambrano egresado de la Universidad el bosque en el año 2013, quien adapta la metodología descrita en *The water footprint assessment manual* para calcular el consumo de agua en un cultivo de rosa ubicado en el municipio el rosal, Cundinamarca. En este trabajo se determinó que el consumo más elevado de agua se realiza en la fases de fertilización y el riego, según las observaciones y cálculos realizados, ya que son procesos que requieren diariamente

grandes cantidades de agua y generan al mismo tiempo elevados vertimientos resultantes de la actividad. También es importante recalcar que se proponen diferentes estrategias para la reducción de la huella, entre ellas el fortalecimiento en la educación de los floricultores y la implementación de tecnologías limpias para el tratamiento de las aguas residuales (Beltran, 2013).

Otro de los proyectos de investigación donde se desarrolla el cálculo de huella hídrica para la agricultura, es el trabajo realizado por la ingeniera Yury Milena Guzmán Rodríguez, egresada DE la Universidad El Bosque quien en el año 2011 calcula la huella hídrica en el cultivo de papa para la variedad pastusa suprema en el municipio de Carmen de Carupa, determinando que el componente de huella gris es el más representativo de la huella general, debido al uso constante de fertilizantes con grandes cargas de químicos tóxicos como el Nitrógeno. Este trabajo se desarrolló bajo dos metodologías, *The water footprint assessment manual* y la metodología propuesta por la FAO CROPWAT 8.0 (Rodríguez, 2011).

1.2.2 Pregunta de investigación

El municipio de Guayatá se caracteriza por ser un territorio con una temperatura que oscila entre los 15°C y 17°C, compuesta por 4 sistemas orográficos importantes: El embalse de la Esmeralda, el Cañón del río Súnuba, Cuchilla de San Cayetano y el Alto de Somondoco. También cuenta con diferentes tipos de bosques de gran importancia ecosistémica como lo son los bosques secos, bosques húmedos bajos y bosques muy húmedos, lo que permite que el territorio sea rico en biodiversidad y suelos óptimos para cultivos (Amaya, 2001). En cuanto al sistema hídrico del municipio, Guayatá cuenta con diversas quebradas: Q. Tencua, Q. Negra, Q. Sochaquira, Q. Risatá, y dentro de sus ríos principales está el Río Sunuba (Amaya, 2001).

Las principales actividades económicas del municipio de Guayatá son la agricultura seguida de la ganadería; los principales cultivos que se generan en el territorio son el café, la caña panelera, el maíz, yuca, papa, frijol, entre otros. Con el paso del tiempo esta actividad tomo fuerza y se hizo inevitable la expansión acelerada de la agricultura en el territorio (Zambrano, 2012). Una de las principales consecuencias del crecimiento agrícola del municipio es la erosión, ya que los campesinos han deforestado los bosque que conforman las riberas de los ríos para plantaciones principalmente de café; problemas como la desaparición de fauna nativa y cambios en las propiedades físico químicas del suelo también son consecuencia de estas actividades (Zambrano, 2012). A lo anterior se suma la expansión de otros sectores de la economía como lo son industrias lactas, porcícolas, el uso doméstico del recurso hídrico que con el paso de los años se ha incrementado de manera directamente proporcional al crecimiento demográfico del territorio, entre otros.

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el consumo real de agua en la microcuenca hidrográfica del río Sunuba en el municipio de Guayatá, Boyacá?

Fuente: propia

1.3 JUSTIFICACIÓN

La gestión integral del recurso hídrico es un tema de gran importancia en la actualidad, pues ha permitido estudiar de manera concreta como se debe administrar el agua dentro de cualquier proceso, con el fin de lograr un uso eficiente del recurso y al mismo tiempo ser una estrategia fundamental en la búsqueda del desarrollo sostenible en la mayoría de los sectores productivos. En Colombia, el sector agrícola es uno de los más influyentes y el café uno de los productos emblemáticos de la nación, siendo reconocida por Rainforest Alliance como un país pionero en la producción de café de alta calidad, ocupando el tercer lugar a nivel mundial.

Para lograr una gestión eficiente en el uso del recurso hídrico, es fundamental recalcar que la cuantificación de la huella hídrica debe ser prioritaria en el mejoramiento de cualquier proceso productivo, ya que esta permite establecer medidas para prevenir, mitigar y corregir problemas con el uso del agua en sectores productivos como lo es la agricultura, siendo de suma importancia para el mismo. Esto implica desarrollar modelos matemáticos complejos, algunos propuestos en el manual “The water footprint assessment manual” desarrollado por la UNESCO, como herramientas de cálculo efectivas y con márgenes de error casi nulos.

El cálculo de la huella hídrica en el municipio de Guayatá nace principalmente del interés personal en aportar conocimientos técnicos y científicos en temas de hidrología, zonificación y sostenibilidad ambiental tanto en situaciones prácticas como a la academia, pues en la actualidad, cuantificar los diversos usos del agua e identificar los impactos que dicho usos o consumos genera en el ambiente, es fundamental para el desarrollo ecológico de una región o espacio geográfico. En este tiempo existe una necesidad importante en el municipio por saber de qué manera sus pobladores están utilizando el recurso hídrico en el sector no solo agrícola sino industrial y doméstico, ya que de estos depende gran parte de la economía de su territorio. igualmente es una gran oportunidad para que el municipio pueda planificar el territorio en base al uso y distribución del agua, garantizando satisfacer las necesidades básicas de la comunidad, generando áreas de protección y conservación, formulando estrategias de adaptación al cambio climático, promoviendo la conciencia ambiental y sentido de pertenencia por los recursos naturales, mejorando las diversas prácticas actuales, innovando en temas de tecnología responsable, desarrollando investigación científica dentro del municipio y generando medidas de mitigación a diversos problemas ambientales referentes al manejo inadecuado del recurso hídrico.

Por lo anterior, cuantificar la huella hídrica del cultivo de café en el municipio de Guayatá es una puerta para fomentar el desarrollo del territorio, además de ser una oportunidad para que los campesinos y agricultores aprendan a conservar tanto los ecosistemas de la región como los recursos hídricos del mismo. No obstante, es importante aclarar que el cálculo de dicha huella en este proyecto se hará para cada uno

de los sectores productivos y específicamente a la microcuenca hidrográfica del Río Sunuba, al ser la fuente fundamental de oferta para la población.

Este proyecto de investigación también le ha dado a la Universidad Católica de Colombia una herramienta que le permite fortalecer sus conocimientos acerca del recurso hídrico y le da la oportunidad de abrir más investigaciones sobre el desarrollo sostenible a nivel multisectorial en el país.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Cuantificar la huella hídrica de la microcuenca hidrográfica del río Sunuba del Municipio de Guayatá Boyacá.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la micro Cuenca hidrográfica del río Sunuba a nivel sectorial
- Aplicar el modelo de cuantificación de huella hídrica que se adapte más a la microcuenca de estudio
- Formular propuestas y estrategias para mejorar la sostenibilidad del recurso hídrico en el área e estudio

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

Algunos de los conceptos básicos para el cálculo de la huella hídrica son:

Se entiende como precipitación el volumen de agua que cae sobre un territorio por la acción de la gravedad en forma de lluvia o granizo como resultado de la condensación del agua, la cual depende de la temperatura y la humedad atmosférica (Herrán García, y otros, 2013).

La escorrentía es la lámina de agua dulce que circula sobre la superficie de una cuenca de drenaje, expresada como un valor de altura en mm de agua lluvia que escurre y se extiende en ella, según lo descrito por (Herrán García, y otros, 2013)

La evapotranspiración es la pérdida de humedad de una superficie que se da por evaporación directa junto con la pérdida de agua por el proceso de transpiración de la vegetación expresada en milímetros por unidad de tiempo (Herrán García, y otros, 2013)

La huella hídrica verde se refiere al consumo de los recursos de agua lluvia que no se convierte en escorrentía, sino que son almacenados por el suelo y evapotranspirados por la planta (IDEAM, 2014)

Según el Estudio nacional del agua, la huella hídrica azul se refiere al consumo de los recursos de agua superficial y subterránea a lo largo de la cadena de suministro de un producto. Se refiere a la pérdida de agua disponible, superficial o subterránea, a causa de una captación para un fin determinado. Las pérdidas se producen cuando el agua se evapora, vuelve a otra área de influencia o en el mar o se incorporen a un producto (IDEAM, 2014).

Con respecto a la huella hídrica gris, el Estudio nacional del agua la define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes que se generan en un proceso productivo tomando como referencia las concentraciones naturales del agua, debidamente estipuladas en las normas de calidad ambiental según el país donde se realice (IDEAM, 2014)

2.2 MARCO TEÓRICO

El agua es un factor determinante en el desarrollo económico y social y, al mismo tiempo, cumple la función básica de mantener la integridad del entorno natural. Por tanto es necesario que los gestores tanto gubernamentales como del sector privado, y la comunidad intercambien sus experiencias, conocimientos y opiniones a la hora de tomar decisiones sobre la asignación del recurso. Actualmente la oferta hídrica está disminuyendo frente a una demanda, gracias a la influencia de factores como los cambios demográficos de las poblaciones, los cambios climáticos elevados y la falta de conciencia por parte de la comunidad sobre el uso eficiente del recurso.

Como bien lo cita el profesor A.Y. Hoekstra, A. C. durante el (2004). En su texto *“Water footprints of nations. Volume 1: Main Repor”*. En Netherlands: UNESCO-IHE Delft, la huella hídrica *“es un indicador de uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como indirecto por parte de un consumidor o productor. La huella hídrica de un individuo, comunidad o comercio se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o comunidad así como los producidos por los comercios. este concepto se desarrolla con gran amplitud y de manera práctica”*. Por tanto, se convierte en una herramienta importante para lograr una gestión integral óptima de los recursos hídricos a nivel empresarial, personal, regional y nacional.

2.3 MARCO JURÍDICO

- ISO 14046 de 2014: esta norma internacional especifica los principios, requisitos y directrices necesarios para realizar la evaluación de la huella hídrica de los productos y procesos basándose en la evaluación del ciclo de vida. Dentro de esta norma se describen los términos necesarios para la elaboración de la huella hídrica, el enfoque ambiental de esta y el marco metodológico que se debe seguir (ISO, 2014).
- Decreto 2811 de 1974: Código Nacional de Recursos Naturales Renovables, donde se habla de preservación del recurso hídrico, las concesiones para su explotación, los factores de degradación de este, ocupación de cauce, el consumo de agua, tipos de agua, los derechos de uso, entre otros temas de suma importancia a la hora de calcular una huella hídrica.
- Decreto 309 del 2000: formula las disposiciones generales referentes al manejo y conservación de los recursos hidrobiológicos
- DECRETO 2857 de 1981: Ordenación y protección de cuencas hidrográficas.
- POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO: describe los objetivos, principios, lineamientos, estrategias y acciones encaminadas a administrar, manejar, dar seguimiento y monitorear todo lo referente

al recurso agua. Por medio de esta también se crea el plan hídrico nacional orientado a garantizar la disponibilidad del recurso, la calidad de este y los riesgos asociados a la gestión de este recurso (MAVDT, 2010).

- **POLÍTICA NACIONAL DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA:** describe a detalle los usos del agua y los beneficios de invertir en este tipo de producción, además de relacionar dichos usos con la optimización de procesos, ahorro y conservación del recurso (Ministerio del Medio Ambiente , 1997).
- Decreto 4742 de 2005: establece las tasas de utilización de aguas.
- Decreto 2667 de 2012: reglamenta la tasa retributiva por utilización directa e indirecta del agua como receptor de vertimientos puntuales.
- Decreto 3930 de 2010: Reglamenta el título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre los usos del agua y residuos líquidos, con respecto a los permisos de vertimientos.
- Decreto 2858 de 1981: Concesión de Aguas.

2.4 MARCO GEOGRÁFICO

El municipio de Guayatá se caracteriza por ser un territorio con una temperatura que oscila entre los 15°C y 17°C, compuesta por 4 sistemas orográficos importantes: El embalse de la Esmeralda, el Cañón del río Súnuba, Cuchilla de San Cayetano y el Alto de Somondoco. También cuenta con diferentes tipos de bosques de gran importancia ecosistémica como lo son los bosques secos, bosques húmedos bajos y bosques muy húmedos, lo que permite que el territorio sea rico en biodiversidad y suelos óptimos para cultivos (Amaya, 2001). En cuanto al sistema hídrico del municipio, Guayatá cuenta con diversas quebradas: Q. Tencua, Q. Negra, Q. Sochaquira, Q. Risatá, y dentro de sus ríos principales está el Río Sunuba (Amaya, 2001).

Este municipio Limita al Norte con Guateque (5,7 km), al Oriente con Somondoco (12,7 km), al Occidente con Manta y al Sur con Gachetá y Ubalá (31,5 km) (Amaya, 2001).

2.5 ESTADO DEL ARTE

El artículo “*Spatially Explicit Analysis of Water Footprints in the UK*” tiene como objetivo principal, evaluar las necesidades que presenta el Reino Unido con respecto a

su consumo de agua no solo en los procesos productivos sino en las regiones, es decir, de manera multirregional. El método utilizado en este estudio fue el modelo MRO (Input-Output Multi-Regional), el cual consiste en utilizar el sistema económico de las regiones y vincularlos en un proceso de entrada – salida donde se refleje la manera en la que se relaciona con otros y así identificar cual región hace uso de una mayor cantidad de agua. Los resultados obtenidos reflejan que dependiendo de las condiciones económicas de cada una de las regiones el uso del agua aumenta o disminuye, para este caso, la huella hídrica calculada es de 439 m³/año siendo 3 veces más grande que el mismo Reino Unido (Feng, y otros, 2011).

A partir de lo anterior, podemos inferir que el modelo utilizado, aunque es reconocido en el mundo por su efectividad y al ser usado principalmente para calcular huellas hídricas referentes tanto al territorio como al sector productivo, es un modelo enfocado más hacia el cálculo regional específico y no tan específico (Feng, y otros, 2011).

Tabla 1. Huella hídrica por sectores

Sectors	DWI	Production water footprints		
		Domestic FD	Export	Total
Agriculture	1,964.1	7,747	854	8,601
Livestock	44.3	547	60	607
Forestry	146.5	25	9	33
Fishing	1,288.1	44	506	550
Mining	3.5	3	85	88
Food products	3.5	3,245	727	3,971
Textiles	2.0	11	12	24
Leather products	2.0	11	22	33
Wood products, except furniture	3.2	9	4	13
Paper, paperboard and publishing	3.2	56	45	101
Chemicals	8.1	73	428	501
Non-metal mineral products	2.5	10	17	26
Metal products	7.0	56	154	211
Manufacture Machinery	0.6	30	85	116
Electric machinery	0.8	29	101	130
Transport equipment	1.6	108	183	291
Other manufacturing	2.8	53	19	72
Electricity and gas production	78.1	1,637	25	1,662
Water supply	78.1	227	0	227
Construction	0.1	333	0	333
Retail and trade	0.8	978	131	1,109
Hotels and restaurants	0.8	1,987	219	2,206
Transportation	0.4	63	49	112
Business and finance	0.4	347	188	535
Public administration	0.4	379	1	379
Education	1.0	297	6	303
Health and Social activities	1.0	568	0	568
Recreational and cultural activities	0.4	156	22	178
Total	-	19,029	3,948	22,977
Production WF per person (m ³)	-	317	66	383

Fuente: (Feng, y otros, 2011)

En la tabla anterior se reflejan los resultados obtenidos por la implementación del modelo MRIO.

El artículo “*La Huella Hidrológica de la Agricultura Española*”, realizado en el año 2008 tiene como objetivo principal estimar la huella hidrológica adaptando la metodología diseñada por el profesor Aren Hoekstra de la UNESCO – IHE (Institute of Water Corporation), el cual consiste en calcular de antemano el volumen total de agua necesario de manera directa o indirecta en la producción de bienes y servicios; es importante tener en cuenta que la cobertura de agua se divide en: uso interno y uso externo, es decir, el primero hace referencia al consumo interno y el externo aquel recurso que es exportado. Teniendo calculado este volumen ya es posible comenzar con el desarrollo de la huella hídrica. Específicamente para la agricultura, (WFAgr) equivale al uso de los recursos hídricos en dicha actividad, (UAAgr), más las ‘importaciones’ de agua virtual contenida los productos agrícolas y ganaderos (VWI,Agr), menos el agua virtual ‘exportada’ en estos productos (VWE,Agr) (Roberto Rodríguez Casado, Alberto Garrido Colmenero, Manuel Ramón Llamas Madurga, & Consuelo Varela Ortega, 2008):

$$WF_{Agr} (m^3) = UA_{Agr} + VW_{I,Agr} - VW_{E,Agr}$$

Dentro de esta metodología, es importante tener en cuenta el cálculo del agua verde y azul, y el flujo del agua vertical (Roberto Rodríguez Casado, Alberto Garrido Colmenero, Manuel Ramón Llamas Madurga, & Consuelo Varela Ortega, 2008)

Entre los resultados se obtuvo:

Tabla 2. Huella hídrica.

	<i>HUELLA HIDROLÓGICA DE ESPAÑA</i>				
	<i>Interna (hm³)</i>	<i>Externa (hm³)</i>	<i>Total (hm³)</i>	<i>Población¹ (10⁶)</i>	<i>Per cápita (m³/año)</i>
1998 Seco	19.386	25.271	44.588	39,85	1118
2001 Normal	19.954	27.794	47.679	41,12	1159
2003 Húmedo	18.182	31.066	49.179	42,72	1151

Fuente: (Roberto Rodríguez Casado, Alberto Garrido Colmenero, Manuel Ramón Llamas Madurga, & Consuelo Varela Ortega, 2008)

El artículo “*Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México*”, realizado durante el año 2014, hace uso de la metodología de propuesta también por el profesor Aren Hoekstra de la UNESCO – IHE (Institute of Water Corporation), específicamente para realizar el cálculo de la huella azul, que consiste en definir los índices de eficiencia física, expresada en kg m^3 (Y_1 y Y_2), de productividad económica (Y_3 - Y_7 , Y_{12} - Y_{13}) y de eficiencia social (Y_8 - Y_{11}). Como resultado se obtuvo el valor de los indicadores y a partir de estos la huella hídrica azul como se ilustra en las siguientes tablas:

Tabla 3. Indicadores de eficiencia física, social y de productividad

Variable económica	Alfalfa	Maíz forrajero	Avena forrajera	Sorgo forrajero	Rye grass	Grupo forrajero
$Y_1 = \text{L kg}^{-1}$	264	190	413	181	290	252
$Y_2 = \text{kg m}^{-3}$	3,79	5,28	2,42	5,51	3,44	3,98
$Y_3 = \text{L US\$1}^{-1}$ ingreso bruto	8,852	4,567	13,862	5,319	13,038	7,529
$Y_4 = \text{Ingreso bruto US\$m}^{-3}$	\$ 0,11	\$ 0,22	\$ 0,07	\$ 0,19	\$ 0,08	\$ 0,13
$Y_5 = \text{Utilidad bruta US\$ m}^{-3}$	\$ 0,05	\$ 0,07	-\$ 0,04	\$ 0,04	-\$ 0,07	\$ 0,04
$Y_6 = \text{Utilidad bruta L US\$1}^{-1}$	19,523	14,258	-22,241	23,160	-15,145	24,220
$Y_7 = \text{Utilidad bruta m}^{-3} / \text{US\$ m}^{-3}$	1,80	2,82	-1,87	1,78	-2,12	1,94
$Y_8 = \text{Empleos h m}^{-3}$	0,37	0,69	0,68	0,71	0,76	0,48
$Y_9 = \text{h t}^{-1}$	2,22	3,03	6,44	2,98	5,06	2,28
$Y_{10} = \text{Ganancia trabajador}^{-1} \text{ US\$}$	\$ 14,028	\$ 10,115	-\$ 6,643	\$ 6,052	-\$ 8,739	\$ 8,501
$Y_{11} = \text{Ganancia h}^{-1} \text{ US\$}$	\$ 6,1	\$ 4,4	-\$ 2,9	\$ 2,6	-\$ 3,8	\$ 4,6
$Y_{12} = \text{Punto de equilibrio (t ha}^{-1}\text{)}$	43,89	31,64	34,69	37,48	56,53	39,02
$Y_{13} = \text{Vulnerabilidad crediticia}$	1,83	1,47	0,62	1,30	0,54	1,45

Fuente: (Flores, Moreno, Franco, Moreno, & Torres, 2014)

Tabla 4. Huella hídrica Azul

	forrajero	forrajero	TOTAL	de alfalfa		Situación actual	Situación actual	actual	actual
Superficie (ha)	43,971	28,849	72,820	72,820	72,820	0	0	1,0	1,0
Rendimiento (t ha ⁻¹)	46,55	48,65	47,38	80,31	56,67	- 9,29	23,64	0,84	1,42
Producción (t)	2.046,849	1.403,510	3.450,359	5.848,182	4.126,616	- 676,257	1.721,566	0,84	1,42
Precio/ton (US\$ t ⁻¹)	41	35		31					
Costo/ha (US\$ ha ⁻¹)	1,356	1,278		1,351					
Jornales ha ⁻¹	18	18		22					
Lámina de riego (mm)	0,75	0,75		2					
Volumen de agua (Mm ³)	330	216	546	1,311	1,038	- 492	273	0,53	1,26
VBP (Millones de dólares US\$)	\$ 84,90	\$ 49,4	\$ 134,4	\$ 179,9	\$ 137,8	-\$ 3,45	\$ 42,14	0,975	1,306
Costo global (Millones de dólares US\$)	\$ 59,6	\$ 36,9	\$ 96,5	\$ 98,3	\$ 94,9	\$ 1,57	\$ 3,41	1,017	1,036
Ganancia global (Millones de dólares US\$)	\$ 25,3	\$ 12,6	\$ 37,8	\$ 81,6	\$ 42,9	-\$ 5,02	\$ 38,74	0,883	1,904
Relación Beneficio- Costo	1,42	1,34	1,45	1,83	1,45				
Nºde empleos permanentes	2,690	1,816	4,506	5,631	4,975	- 469	656	0,91	1,13
Indicadores de Huella hídrica a nivel de todo el grupo forrajero									
L kg ⁻¹			158	224	252	- 93	- 27	0,63	0,89
Kg m ⁻³			6,32	4,46	3,98	2,34	0,49	1,59	1,12
L por US\$ 1 de ganancia			14,433	16,064	24,220	- 9,787	- 8,156	0,60	0,66
Ganancia US\$ m ⁻³			\$ 0,069	\$ 0,062	\$ 0,04	\$ 0,028	\$ 0,021	1,68	1,51

Fuente: (Flores, Moreno, Franco, Moreno, & Torres, 2014)

Interpretando lo anterior se tiene que los resultados muestran que los forrajes ocuparon 45% de la superficie total agrícola, empleando 94,7% del agua subterránea, generando 33% del Valor Bruto de la Producción agrícola. Con respecto a la productividad física fueron 252 L kg⁻¹. El indicador de eficiencia social mostró que se generaron 0,048 empleos hm⁻³. Finalmente, la cantidad mínima que se requiere producir para tener una operación viable (punto de equilibrio) en promedio fue 39,02 t ha⁻¹ (Flores, Moreno, Franco, Moreno, & Torres, 2014).

El artículo “*Evaluación y análisis de la huella hídrica y agua virtual de la producción agrícola en el Ecuador*” realizado durante el año 2012, busca principalmente evaluar y analizar la huella hídrica en 12 cultivos en Ecuador: Frutas (banano, naranja y plátano), hortalizas (yuca, tomate y papa), industriales (cacao, caña de azúcar, palma y café) y granos básicos (maíz y arroz), además de determinar el valor económico del agua. Como metodología se optó por utilizar el modelo internacional del profesor Aren Hoekstra de la UNESCO – IHE (Institute of Water Corporation), calculando la huella hídrica verde, azul y gris en cada uno de los cultivos identificados, así como la huella hídrica según el crecimiento de los cultivos y por ultimo pero no menos importante la evapotranspiración, pero en este caso haciendo uso de CROPWAT 8.0, un programa computarizado diseñado por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) para calcular los requerimientos de agua de los cultivos y las necesidades de riego de los mismos, basados en variables como el clima y el suelo (Arcos, 2012).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 5. Evaluación huella hídrica 2007 y 2008

Cacao	7,971	16,861	119	24,951	Cacao	6,485	15,445	114	22,044
Caña de Azúcar	23	31	20	74	Caña de Azúcar	59	52	20	131
Naranja	1,595	1,769	0.0	3,364	Naranja	2,276	1,478	0.1	3,754
Palma	236	237	59	531	Palma	203	178	42	423
Plátano	1,059	833	0.0	1,892	Plátano	1,089	849	0.0	1,938
Arroz con cáscara	423	769	91.56	1,284	Arroz con cáscara	556	485	92	1,133
Maíz	1,136	963	358.92	2,458	Maíz	1,163	944	346	2,453
Papa	112	495	95.96	703	Papa	243	1,037	96	1,376
Yuca	534	442	0.96	976	Yuca	780	894	1	1,675
Tomate	182	198	0.16	379	Tomate	199	1,326	0.0	1,526
Café	10,343	8,111	106.84	18,561	Café	18,443	11,178	111	29,733

Fuente: (Arcos, 2012)

Tabla 6. Evaluación huella hídrica 2009 y 2010

Año 2009		HH m³/ton				Año 2010		HH m³/ton			
Cultivos		verde	azul	gris	Total	Cultivos		verde	azul	gris	Total
Banano		854	1,275	0.0	2,129	Banano		566	1,009	0.0	1,574
Cacao		6,076	12,849	104	19,028	Cacao		5,533	13,042	119	18,694
Caña de Azúcar		30	38	20	88	Caña de Azúcar		36	38	20	94
Naranja		2,723	2,601	0.1	5,324	Naranja		3,890	2,515	0.1	6,406
Palma		230	265	59	554	Palma		205	153	59	417
Plátano		1,057	1,004	0.0	2,062	Plátano		3,643	1,647	0.0	5,289
Arroz - cáscara		264	643	86	993	Arroz - cáscara		402	551	86	1,039
Maíz		1,205	1,153	359	2,718	Maíz		1,250	964	359	2,572
Papa		75	759	83	917	Papa		192	620	96	908
Yuca		670	702	1	1,373	Yuca		866	567	1	1,434
Tomate		159	167	0.0	326	Tomate		74	59	0.0	133
Café		10,559	8,148	111	18,809	Café		11,01	7,147	107	18,273

Fuente: (Arcos, 2012)

El artículo “*Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola*”, realizado durante el año 2011 hace un análisis detallado sobre los resultados de la huella hídrica agrícola del país, haciendo uso de la metodología Water Footprint Network, calculando la huella hídrica verde, azul, gris y total con respecto a los resultados obtenidos en el ENA (Estudio Nacional del Agua) y la información recolectada de la FAO a través de su aplicación Aquastat y el uso de un HidroSIG (Arévalo & Sabogal, 2011).

Los resultados que se obtuvieron fueron:

Tabla 7. Huella Hídrica

RESULTADOS CONSOLIDADOS DE ESTIMACION DE HUELLA HIDRICA DEL SECTOR AGRICOLA COLOMBIANO			
Huella Hídrica Verde (Mm³/año)	Huella Hídrica Azul (Mm³/año)	Huella Hídrica Gris (Mm³/año)	Huella Hídrica Total (Mm³/año)
34.242	2.804	2.098	39.144

Fuente: (Arévalo & Sabogal, 2011)

Gráfico 1. Correlación para condiciones normales



Fuente: (Arévalo & Sabogal, 2011)

Se puede observar el Café prevalece, ya que es el principal cultivo agrícola del país, y el primero en cuanto al consumo de agua asociada a la precipitación gracias a la gran disgregación del área cultivada de Café a lo largo del territorio. Sólo 4 cultivos: Café, Plátano, Maíz y Caña de Azúcar sumaron más del 50% de la Huella Hídrica verde de la producción agrícola en el año de estudio (Arévalo & Sabogal, 2011).

Gráfico 2. Distribución HH Azul

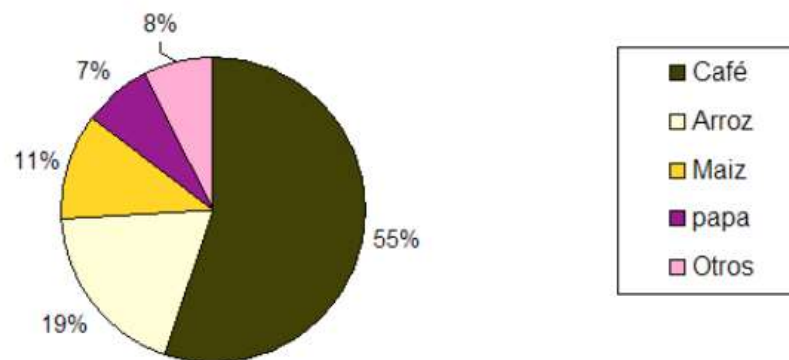


Fuente: (Arévalo & Sabogal, 2011)

Con respecto a la huella hídrica azul, el cultivo de arroz sobresale ya que es el que utiliza los principales distritos de riego de Colombia. Sólo 5 cultivos que sumaron más del 75% de toda el agua azul del periodo analizado: Arroz, Palma Africana, Maíz, Caña de Azúcar y Yuca (Arévalo & Sabogal, 2011).

Gráfico 3. Distribución HH Gris

Distribución Porcentual de la Huella Hídrica Gris del sector agrícola por producto



Fuente: (Arévalo & Sabogal, 2011)

En este caso vuelve a ser protagonista el Café, lo que significa que es de los cultivos más contaminantes.

3 METODOLOGÍA

3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

Para la fase I, se selecciona el área de estudio dentro del municipio de Guayatá, Boyacá, se realiza un levantamiento de información primaria y secundaria sobre las etapas del proceso productivo, doméstico e industrial por medio de una revisión bibliográfica exhaustiva en la base de datos de la Corporación Autónoma Regional de Chivor y se lleva a cabo una visita de campo técnica para corroborar la información obtenida previamente, información suministrada directamente por la subdirección de gestión ambiental de la entidad. A partir de lo anterior fue posible caracterizar detalladamente cada proceso y así cumplir con el objetivo específico 1 de esta investigación.

Con respecto a la fase II, se analizaron diversas metodologías para el cálculo de huella hídrica por medio de una revisión bibliográfica donde se identificaron diferentes estudios realizados a nivel nacional e internacional en los cuales se desarrollaban diversos métodos de cuantificación y cuáles de estos serían los más óptimos para la investigación según las condiciones actuales de la microcuenca de estudio, cumpliendo con el objetivo específico 2 formulado en la investigación.

Finalmente en la fase III, se procede a calcular la huella hídrica verde, azul y gris por medio de la metodología escogida previamente determinando el consumo real de agua en la microcuenca de estudio a nivel multisectorial dando cumplimiento del objetivo específico 3 de la misma. Dentro de esta misma fase se proponen diferentes estrategias para reducir la huella hídrica calculada en el área de estudio, contribuyendo con la optimización de procesos y así aportar a la sostenibilidad del mismo.

3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

3.2.1 Balance Hídrico Agrícola

Es un modelo matemático ampliamente utilizado para conocer el comportamiento del agua en la cadena de consumo de los diferentes sistemas agrícolas que existen, con el fin de determinar la demanda de agua que requiere el sector y a su vez cuanta está consumiendo. Dentro de este modelo se tienen en cuenta diferentes variables importantes como lo son la evapotranspiración, la escorrentía, la precipitación, el sistema de riego, entre otras, las cuales permiten calcular tanto la huella hídrica verde como la huella hídrica azul (Herrán García, y otros, 2013).

Para el cálculo del balance, la “*Guía de lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua – ERA 2013*” describe la siguiente ecuación:

$$Da = 10 \sum_{d=1}^{ip} \frac{[(U.C) - \frac{P_{efc}}{100}]}{Kr} * A$$

Donde:

Da: requerimiento de agua del cultivo (m³/ha.)

10 = factor que se aplica para convertir a (m³/ha.)

Ip = duración del periodo de crecimiento

Kc = coeficiente de cultivo (adimensional)

U.C = uso consuntivo del agua

P_{efc} = Precipitación efectiva (mm)

Kr = coeficiente de eficiencia de riego (adimensional)

A = área sembrada (ha.)

A partir de la ecuación del balance hídrico agrícola, se derivan otras metodologías importantes a tener en cuenta para el cálculo de huella hídrica:

3.2.1.1 *Uso consuntivo del agua*

$$U.C = ETP * Kc$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial

Kc = coeficiente de cultivo

3.2.1.2 *Precipitación Efectiva*

$$P_{\text{efc}} = P * K_e$$

Donde:

K_e = coeficiente de infiltración

P = Precipitación (mm)

3.2.1.3 *Coeficiente de infiltración*

$$K_e = 1 - \frac{E_{sc}}{P}$$

Donde:

E_{sc} = escorrentía media

P = precipitación (mm)

3.2.1.4 *Riego Bruto*

$$R_{\text{bruto}} = U.C - P_{\text{efec}}$$

Donde:

U.C = uso consuntivo de agua

P_{efec} = precipitación efectiva (mm)

3.2.1.5 *Efectividad de Riego*

$$E_{\text{riego}} = \frac{R_{\text{bruto}}}{K_r}$$

Donde:

R_{bruto} = riego bruto (mm)

K_r = coeficiente de eficiencia de riego

3.2.2 *Ecuación de Budyko*

Es ampliamente utilizada para calcular valores tanto de ETP como ETR.

$$ETR = \left\{ ETP \cdot P \cdot \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Fuente: (Budyko, 1974)

Donde:

ETR = EVAPOTRANSPIRACION REAL

P = precipitación (mm)

ETP = evapotranspiración potencial

3.2.3 Ecuación de Turc

Esta ecuación se utiliza para calcular valores de ETR en función de la temperatura y la precipitación

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

P = precipitación (mm)

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

T = temperatura

3.2.4 Metodología para el cálculo de la huella hídrica verde

A partir del cálculo del balance hídrico agrícola y sabiendo que la huella hídrica verde se refiere a la estimación del agua evapotranspirada por el cultivo que no proviene de agua de riego, el valor correspondiente a la precipitación efectiva, dentro del balance hídrico agrícola, será huella hídrica verde en m³/ha.

$$HH_{\text{verde}} = P * K_e \text{ (m}^3\text{/ha.)}$$

3.2.5 Metodología para el cálculo de la huella hídrica azul

A partir del balance hídrico agrícola, el valor de la huella hídrica azul corresponderá a la ecuación de efectividad de riego dado en m³/ ha, ya que este también hace referencia al requerimiento hídrico (captación de agua de ríos, lagos, etc.) que presenta un cultivo y que no retorna a su cuenca de origen, como se menciona anteriormente. Esta metodología será efectiva únicamente para el cálculo de la huella hídrica azul para la etapa de semillero y almácigo y para el cálculo en condiciones ideales, puesto que para la etapa de cosecha el valor de esta huella será de cero (0), ya que en el cultivo de café estudiado no cuenta con distrito de riego ni se utiliza ningún otro tipo de fuente para ello.

$$HH_{\text{azul}} = \frac{R_{\text{bruto}}}{K_r} \text{ (m}^3\text{/ha.)}$$

3.2.6 Metodología para calcular la huella hídrica gris

Para el caso de la huella hídrica gris, se utilizó la metodología estipulada por “*the water footprint assessment manual*” desarrollado por la UNESCO bajo la dirección del profesor hoekstra, donde se estipula que el cálculo de esta huella dependerá del contaminante con más concentración en el vertimiento de agua residual, para así mismo conocer la máxima cantidad agua se requiere para diluirlo.

$$HH_{\text{gris}} = \frac{(\alpha * AR) / (C_{\text{mx}} - C_{\text{n}})}{Y} \text{ (m}^3\text{/Ton)}$$

Donde:

α = Fracción de lixiviación por escorrentía

AR= Tasa de aplicación de productos químicos al cultivo por hectárea (Kg/ha)

C_{max} =Concentración máxima permisible del cuerpo de agua (Kg/m³)

C_{nat} = Concentración natural del cuerpo de agua (Kg/m³)

Y= Rendimiento del cultivo (Ton/ha)

3.2.7 Cálculo de la huella hídrica total

Se utilizó al igual que en el cálculo de huella hídrica gris, la metodología estipulada por “*The water footprint assessment manual*” desarrollado por la UNESCO bajo la dirección del profesor Hoekstra donde se refiere a la huella hídrica total como la sumatoria de las 3 huellas dada en m³/Ton

$$\mathbf{HH_{Total} = HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris}}$$

Para el caso concreto de la investigación, los datos finales serán presentados en unidades de m³/kg para el sector productivo, m³/s para el sector doméstico e industrial, con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad.

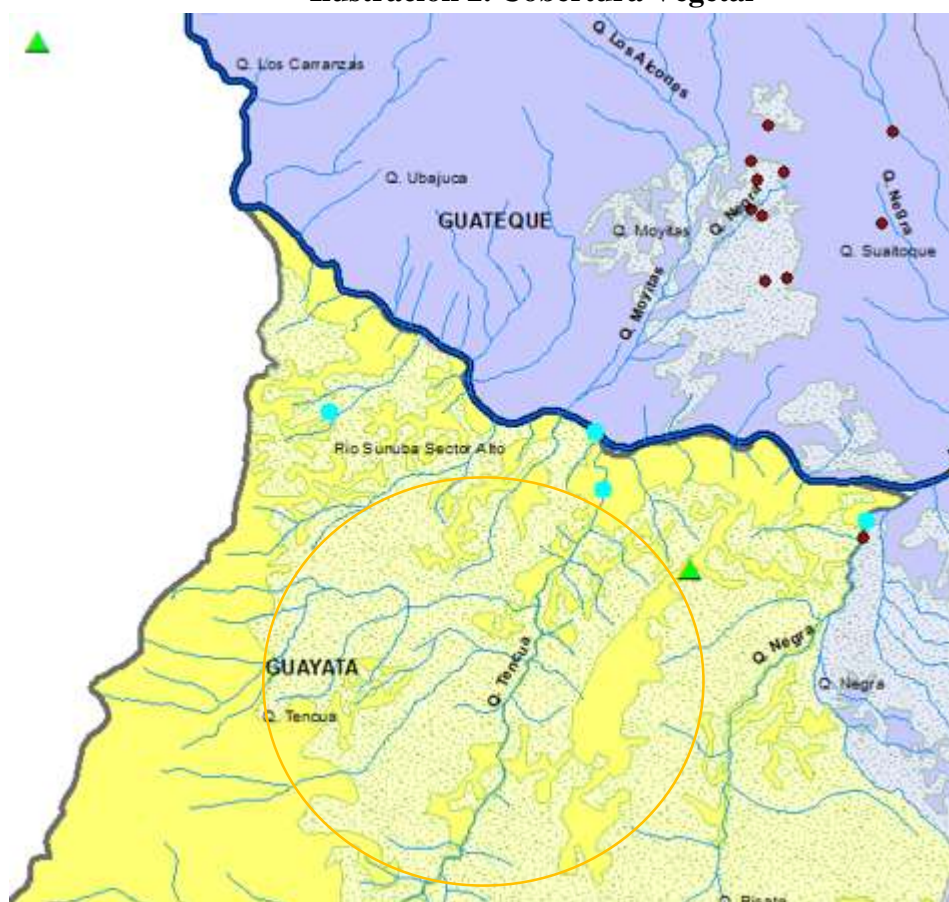
4 RESULTADOS

4.1 CARCTERIZACIÓN MICROCUENCA RIO SUNUBA

4.1.1 Cobertura Vegetal

Según la información registrada en la base de datos de la Corporación Autónoma Regional de Chivor, la cuenca hidrográfica en estudio cuenta con una vegetación conservada, donde predominan especies pertenecientes a bosque alto andino, bosque secundario, matorrales y pastos; sin embargo, es evidente observar la expansión agrícola donde predominan los cultivos de café en toda la microcuenca de estudio. Caber resaltar que el municipio de Guayatá hace parte del área delimitada en el DRMI (Distrito Regional de Manejo Integral) San Cayetano.

Ilustración 2. Cobertura Vegetal



Fuente: CORPOCHIVOR

4.1.2 Hidrología

A continuación se muestran las principales corrientes superficiales con las que cuenta la microcuenca del Río Sunuba

Ilustración 3. Fuentes hídricas



Fuente: CORPOCHIVOR

4.1.3 Estaciones

En la siguiente ilustración se aprecian las estaciones con las que cuenta esta microcuenca

COD	NOMBRE	TIPO
35077080	PUENTE FIERRO	HIDROLGICA AUTOMATICA
35070110	GRANJA	CONVENCIONAL
35075020	SUTATENZA	CONVENCIONAL
35070100	SOMONDOCO	CONVENCIONAL
35070320	SOMONDOCO	CONVENCIONAL
35070480	MANTA - MACHETA	CONVENCIONAL
35070490	MATA - MACHETA	CONVENCIONAL

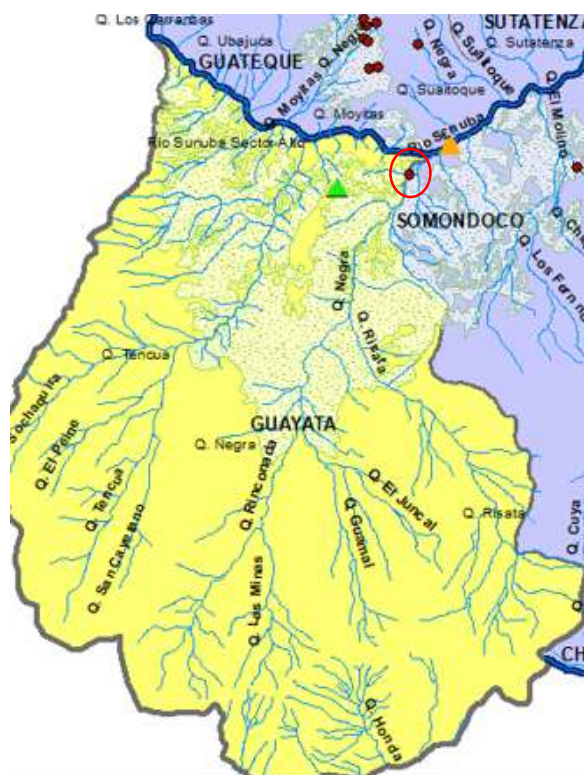
4.1.4 Red de Calidad Hídrica

La Corporación Autónoma Regional de Chivor – CORPOCHIVOR cuenta con una red de calidad hídrica, que tiene como objetivo ejecutar las actividades de Operación, mantenimiento y optimización de los puntos de monitoreo del recurso hídrico en los componentes de Calidad y cantidad (Caudal puntual) sobre las principales corrientes superficiales con una cobertura a nivel de cuenca en el área de la jurisdicción (cuenca del río Garagoa y cuenca del río Súnuba), iniciando con el monitoreo de 15 puntos (2002) y contando a la fecha con 35 puntos, en los cuales se determinan 17 parámetros (físico-químicos y microbiológicos: pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto, medidos en campo y Color Aparente, Cloruros, Nitrógeno Amoniacal, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, Hierro, DQO, DBO5, SST, fosforo Total, Nitrógeno Total Y Coliformes fecales y Totales) y sus respectivos aforos. Estos monitoreos se llevan a cabo en cuatro campañas anuales (abril: transición verano –invierno), (julio: invierno), (septiembre: transición invierno- verano) y (diciembre: verano), de acuerdo al régimen hidrológico de lluvias presentado en la zona (monomodal). A partir del año 2015 se vienen analizando 9 metales (analizados por Absorción Atómica: Mn, Zn, Cd, Pb, Cu, Cr, Al, Si, y K).

[illegible]

Los puntos azules corresponden a las captaciones concesionadas para el sector doméstico y aquellas rodeadas por el color naranja se encuentran debidamente legalizadas.

Ilustración 5. Vertimientos



Fuente: Corpochivor

4.2 CÁLCULO DE LAHUELLA HÍDRICA

A partir de la caracterización realizada a la cuenca hidrográfica Rio Sunuba, se priorizaron los sectores productivos que presentan un consumo elevado del recurso hídrico, dando como resultado que el sector agrícola centrado en la producción de café es el más demandante, seguido por el sector doméstico y para el caso del sector industrial, la demanda es casi nula. Por lo anterior, se realizó el cálculo de la huella hídrica para el café y un inventario de los caudales puntuales sobre las principales corrientes superficiales de la cuenca en estudio para el caso del sector doméstico. A continuación se describe a detalle el procedimiento realizado.

Para este cálculo, fue necesario obtener toda la información hidrometereológica existente en el área de estudio y así poder determinar los factores de temperatura, precipitación, ETP, ETR, escurrimiento necesarios para calcular la huella hídrica verde y azul del área de estudio por medio de la metodología identificada de Balance Hídrico Agrícola, descrita en la “*Guía de lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua - ERA 2013*”. El rango de

tiempo estimado para calcular la huella hídrica es de 10 años (2005 – 2015). Es importante resaltar que este cálculo se llevó a cabo para 3 periodos diferentes condiciones climáticas normales, condiciones climáticas secas o época de sequía correspondiente al periodo vivido en el país de 2014 a 2015 y para condiciones climáticas húmedas o época invernal que para el estudio se identificó el periodo de 2011 a 2012. Para el caso de la huella hídrica gris, fue necesario recolectar toda la información referente al tipo de fertilizante utilizado en la producción de café, complementando dicho cálculo con el análisis fisicoquímico correspondiente a la primera agua miel resultante en la etapa de Post cosecha, es decir, al momento de lavar el café producido. La metodología implementada para esta huella fue “*The water footprint assessment manual*”.

4.2.1 Obtención de la Información Hidrometereológica

La información fue solicitada al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, quienes suministraron los datos necesarios para el cálculo de la huella hídrica como lo fueron: precipitación media multianual, temperatura multianual y evapotranspiración potencial. Para el caso particular de la zona de estudio, el municipio de Guayatá cuenta con una estación meteorológica pluviográfica llamada Guayatá la Granja (código: 35070110), la cual registra datos de precipitaciones totales, precipitaciones máximas en 24 horas y número de días que llueves, por lo que al no contar con la demás información, fue necesario calcularla indirectamente con datos hidrometereológicos registrados por estaciones ubicadas en el resto de la cuenca de estudio. Esta información se obtuvo del Catálogo Nacional de estaciones del IDEAM (Ver tablas 8 y 9).

Tabla 8. Datos de temperatura multianual por estaciones

CÓDIGO	CAT	ELEVACIÓN	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
3508505	CO	1300	21,5	21,7	21,6	21,3	20,9	20,4	19,8	20,2	20,8	21,3	21,4	21,3	21,0
3507503	CO	2200	16,9	17,1	17,5	17,1	16,8	16,2	15,6	15,7	16,1	16,6	16,8	16,6	16,6
3507502	CP	1930	18,2	18,4	18,5	18,3	18,0	17,3	16,7	17,0	17,5	18,0	18,3	18,2	17,9

Fuente: (IDEAM, 2014)

Tabla 9. Datos de evapotranspiración potencial por estaciones

CÓDIGO	CAT	ELEVACIÓN	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ANUAL
3507008	PG	1700	96	89,6	98	90	91	89	97	101	96	91	85	90	1113
3507011	PG	1580	96	89,6	98	90	91	89	97	101	96	91	85	90	1113
3507009	PM	1550	96	89,6	98	90	91	89	97	101	96	91	85	90	1113
3507012	PM	1710	96	89,6	98	90	91	89	97	101	96	91	85	90	1113
3507013	PM	1200	106	99,7	109	100	100	99	109	115	108	102	94	99	1241
3507001	PG	2360	80	76,5	82	76	76	73	79	81,6	78	76	71	75	923
3507010	PM	1600	96	89,6	98	90	91	89	97	101	96	91	85	90	1113
3507502	CP	1930	100	92,2	97	88	85	75	77	82,9	87	91	87	94	1055

Fuente: (IDEAM, 2014)

4.2.1 Sector Agrícola

4.2.1.1 Determinación de la precipitación

Para obtener los datos reales de la precipitación, a la altura de la finca, se optó por utilizar el modelo hidrológico estadounidense soil conservation service (scs), introduciendo el código de la estación meteorológica del municipio y seleccionando el periodo de tiempo estimado anteriormente (2005 – 2015). Este modelo es ampliamente utilizado en el país, especialmente por el IDEAM para determinar precipitaciones multianuales, en función de las características físicas de los suelo, coberturas vegetales, entre otras variables importantes. En la tabla 12 se pueden observar los datos de precipitación obtenidos.

Tabla 10. Datos de precipitación obtenidos del modelo SCS

LATITUD		0458N		TIPO ESTACIÓN		PG		DEPTO		BOYACA		FECHA-INSTALACIÓN	
LONGITUD		7329W		ENTIDAD		01 IDEAM		MUNICIPIO		GUAYATA		15/07/1971	
ELEVACIÓN		1580 m.s.n.m		REGIONAL		6 - DUITAMA		CORRIENTE		SOMONDOCO		FECHA-SUSPENSIÓN	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Valor Anual
2005	54,3	109,0	127,1	127,5	72,5	18,7	87,1	5,1	48,2	311,0	74,9	89,7	1125,1
2006	7,0	62,0	165,2	166,1	148,4	105,2	69,4	121,8	275,3	376,3	146,5	49,7	1693,0
2007	54,1	48,4	68,1	325,7	214,2	158,1	17,7	86,4	114,7	336,4	108,4	57,1	1589,2
2008	45,0	40,3	87,2	186,1	169,2	82,9	193,1	71,9	158,2	529,3	178,0	59,3	1800,5
2009	32,5	106,0	78,7	334,6	102,9	133,1	73,9	217,3	145,0	255,3	473,4	167,4	2120,0
2010	90,3	137,8	135,0	143,8	114,2	221,8	68,1	143,1	308,3	225,2	67,2	96,3	1751,0
2011	33,2	144,1	123,4	129,5	192,0	27,3	78,1	59,0	70,2	478,9	198,1	123,4	1657,2
2012	26,7	82,9	145,1	155,3	63,3	138,8	18,7	22,6	139,3	136,4	198,7	77,9	1205,6
2013	18,0	54,0	168,1	179,1	316,6	77,3	24,0	86,1	86,7	127,9	180,2	38,2	1356,2
2014	62,5	36,9	206,5	225,4	256,6	7,6	59,8	107,1	200,2	204,2	227,4	66,3	1660,5
2015	22,3	131,5	218,0	318,3	151,9	71,3	71,5	39,6	71,6	277,0	301,0	12,0	1686,0
MEDIOS	40,5	86,6	138,4	208,3	163,8	94,7	69,2	87,3	147,1	296,2	195,8	76,1	1604,0

Fuente: Modelo Soil Conservation Service

4.2.1.2 Determinación de la temperatura en condiciones NORMALES, SECAS Y HÚMEDAS

Se realizó una correlación entre los datos de temperatura obtenidos con anterioridad y la elevación de las estaciones. Los valores reales de temperatura se obtuvieron en función de la elevación del sitio de estudio. En la tabla 11 puede observarse dichas valores como resultado de la correlación a nivel anual.

Tabla 11. Valores de temperatura en condiciones normales

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Temperatura	20,1	20,3	20,4	20,1	19,7	19,2	18,6	18,9	19,4	20,0	20,2	20,0	19,7

Fuente: Autor

Para calcular la temperatura real en condiciones secas (2011 – 2012) y húmedas (2014 – 2015) en el área de estudio, se toman los valores solicitados al IDEAM de la estación meteorológica del municipio de Sutatenza (código 3507502), ya que al ser una estación de tipo CP (climatológica principal convencional) registra este tipo de información

Teniendo identificados los valores del periodo seco y el húmedo, se toman los valores de la temperatura media en condiciones normales y los valores de la temperatura correspondientes para cada año de acuerdo con periodo seleccionado, haciendo una diferencia entre ellos y hallando el porcentaje correspondiente, es decir:

$$\text{Diferencia} = \text{Temperatura media} - T^{\circ} \text{ periodo}$$

$$\text{Porcentaje} = \frac{\text{diferencia}}{\text{temperatura media}} * 100\%$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos por periodo:

Tabla 12. Valores para el año Seco 2014

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura Media	18,3	18,6	18,4	18,2	17,9	17,4	17,1	17,2	17,5	17,9	18,2	18,2	17,9
Temperatura periodo seco 2014	17,4	19,3	17,7	17,3	17,5	16,7	16,2	16,1	16,8	16,7	17,7	17,4	17,2
Diferencia	0,9	-0,7	0,7	0,9	0,4	0,7	0,9	1,1	0,7	1,2	0,5	0,8	0,7
%	4,8	-3,8	3,6	4,8	2,5	3,9	5,4	6,4	4,2	6,8	2,9	4,2	3,8

Fuente: Autor

Tabla 13. Valores para el año Seco 2015

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura Media	18,3	18,6	18,4	18,2	17,9	17,4	17,1	17,2	17,5	17,9	18,2	18,2	17,9
Temperatura periodo seco 2015	17,4	17,6	17,8	17,1	17,3	16,3	16,7	16,7	16,8	16,7	17,7	17,4	17,1
Diferencia	0,9	1,0	0,6	1,1	0,6	1,1	0,4	0,5	0,7	1,2	0,5	0,8	0,8
%	4,8	5,4	3,0	5,9	3,6	6,2	2,4	2,9	4,2	6,8	2,9	4,2	4,4

Fuente: Autor

Tabla 14. Valores para el año Húmedo 2010

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura Media	18,3	18,6	18,4	18,2	17,9	17,4	17,1	17,2	17,5	17,9	18,2	18,2	17,9
Temperatura periodo seco 2010	19	19,8	19,1	18,9	18,7	18,1	18,2	17,2	18,1	18,5	18,1	18	18,5
Diferencia	-0,7	-1,2	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7	-1,1	0,0	-0,6	-0,6	0,1	0,2	-0,6
%	-4,0	-6,5	-4,1	-4,1	-4,2	-4,1	-6,3	0,0	-3,2	-3,3	0,7	0,9	-3,2

Fuente: Autor

Tabla 15. Valores para el año Húmedo 2011

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura Media	18,3	18,6	18,4	18,2	17,9	17,4	17,1	17,2	17,5	17,9	18,2	18,2	17,9
Temperatura periodo seco 2011	18,1	17,7	17,7	17,9	17,6	17,2	16,4	17,1	16,8	17,5	18,1	17,8	17,5
Diferencia	0,2	0,9	0,7	0,3	0,3	0,2	0,7	0,1	0,7	0,4	0,1	0,4	0,4
%	0,9	4,8	3,6	1,5	1,9	1,0	4,2	0,6	4,2	2,3	0,7	2,0	2,3

Fuente: Autor

Para el cálculo de la temperatura en el área de estudio correspondiente a los periodos de sequía y humedad se debe aplicar los porcentajes hallados en las tablas 12 a 15 a la temperatura media encontrada (ver tabla 11).

$$\text{Temperatura REAL} = T^{\circ} \text{ media del área de estudio} * \% \text{ del periodo}$$

A continuación se mostraran los resultados obtenidos.

Tabla 16. Valores de temperatura real para el año Seco 2014

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura media	20,1	20,3	20,4	20,1	19,7	19,2	18,6	18,9	19,4	20,0	20,2	20,0	19,7
% Aplicación condiciones secas 2014	4,8	-3,8	3,6	4,8	2,5	3,9	5,4	6,4	4,2	6,8	2,9	4,2	3,8
Temperatura REAL	29,8	19,6	27,7	29,7	24,6	26,7	28,6	31,0	27,6	33,6	26,0	28,4	27,2

Fuente: Autor

Tabla 17. Valores de temperatura real para el año Seco 2015

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura media	20,1	20,3	20,4	20,1	19,7	19,2	18,6	18,9	19,4	20,0	20,2	20,0	19,7
% Aplicación condiciones secas 2015	4,8	5,4	3,0	5,9	3,6	6,2	2,4	2,9	4,2	6,8	2,9	4,2	4,4
Temperatura REAL	29,8	31,3	26,5	31,9	26,7	31,1	23,0	24,3	27,6	33,6	26,0	28,4	28,4

Fuente: Autor

Tabla 18. Valores de temperatura real para el año Húmedo 2010

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura media	20,1	20,3	20,4	20,1	19,7	19,2	18,6	18,9	19,4	20,0	20,2	20,0	19,7
% Aplicación condiciones húmedas 2010	-4,0	-6,5	-4,1	-4,1	-4,2	-4,1	-6,3	0,0	-3,2	-3,3	0,7	0,9	-3,2
Temperatura REAL	19,3	19,0	19,6	19,3	18,8	18,4	17,4	18,9	18,8	19,4	21,6	21,8	19,1

Fuente: Autor

Tabla 19. Valores de temperatura real para el año 2011

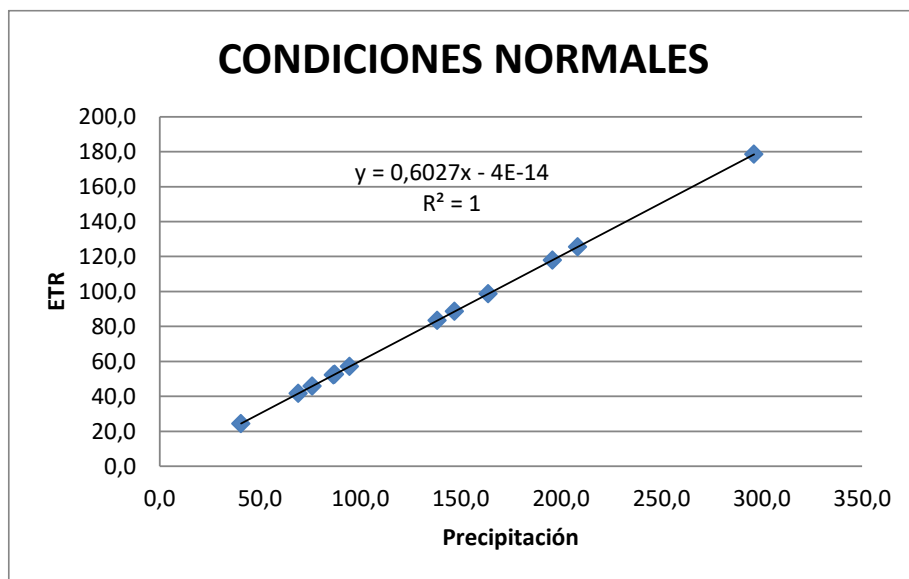
Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
Temperatura media	20,1	20,3	20,4	20,1	19,7	19,2	18,6	18,9	19,4	20,0	20,2	20,0	19,7
% Aplicación condiciones húmedas 2011	-0,7	4,4	2,3	0,0	0,8	-0,4	2,7	-1,5	2,5	0,2	-0,7	-0,3	2,3
Temperatura REAL	20,0	29,3	25,1	20,1	21,2	19,1	23,6	18,6	24,3	20,4	20,0	20,0	24,3

Fuente: Autor

4.2.1.3 *Determinación de la evapotranspiración real ETR en condiciones NORMALES, SECAS y HÚMEDAS*

En primera instancia se realiza una correlación entre los valores de ETR y precipitación para condiciones normales (ver gráfico 4). Posterior a lo anterior, con la ecuación encontrada y con los datos de precipitación para los periodos seleccionados como secos y húmedos, se calcula la ETR para las demás condiciones (2014 – 2015) - (2010 – 2011).

Gráfico 4. Correlación para condiciones normales



Fuente Autor

Se obtiene la siguiente ecuación:

$$y = 0,6027x - 4E^{-14}$$

A partir de la ecuación anterior y con los datos de precipitación para los periodos secos y húmedos se obtienen los datos mensuales de ETR. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Reemplazando en la ecuación anterior, para el mes de enero del año 2014, el cálculo de la ETR es:

$$y = 0,6027(62,5) - 4E^{-14}$$

$$y = 37,7$$

Se realiza dicha operación para el resto de los meses y años como se muestra en las siguientes tablas

Tabla 20. Valores de ETR para el año Seco 2014

AÑO 2014													
Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
PRECIPITACIÓN	62,5	36,9	206,5	225,4	256,6	7,6	59,8	107,1	200,2	204,2	227,4	66,3	1660,5
ETR	37,7	22,2	124,4	135,8	154,7	4,6	36,1	64,6	120,7	123,0	137,0	40,0	1000,8

Fuente: Autor

Tabla 21. Valores de ETR para el año Seco 2015

AÑO 2015													
Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
PRECIPITACIÓN	22,3	131,5	218,0	318,3	151,9	71,3	71,5	39,6	71,6	277,0	301,0	12,0	1686,0
ETR	13,5	79,2	131,4	191,9	91,6	43,0	43,1	23,9	43,2	166,9	181,4	7,2	1016,1

Fuente: Autor

Tabla 22. Valores de ETR para el año Húmedo 2010

AÑO 2010													
Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
PRECIPITACIÓN	90,3	137,8	135,0	143,8	114,2	221,8	68,1	143,1	308,3	225,2	67,2	96,3	1751,0
ETR	54,4	83,1	81,3	86,7	68,8	133,7	41,0	86,3	185,8	135,7	40,5	58,0	1055,3

Fuente: Autor

Tabla 23. Valores de ETR para el año 2011

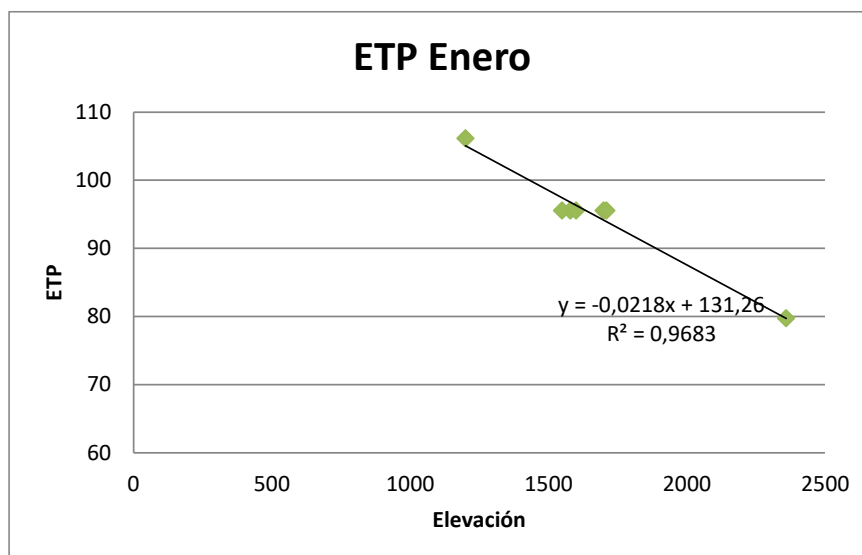
AÑO 2011													
Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
PRECIPITACIÓN	33,2	144,1	123,4	129,5	192,0	27,3	78,1	59,0	70,2	478,9	198,1	123,4	1657,2
ETR	20,0	86,8	74,4	78,0	115,7	16,4	47,1	35,5	42,3	288,7	119,4	74,4	998,8

Fuente: Autor

4.2.1.4 Determinación de la evapotranspiración potencial ETP en condiciones NORMALES, SECAS y HÚMEDAS

En el caso de la evapotranspiración potencial para condiciones normales, también se optó por realizar correlaciones a nivel mensual entre la ETP y la elevación de las estaciones. En el gráfico 5 puede observarse el modelo de la correlación.

Gráfico 5. Correlación entre ETP y elevación



Fuente: Autor

Con respecto a las condiciones secas y húmedas, se utilizó la ecuación de Budyko y los datos obtenidos de cada periodo, calculando la ETP por medio de la metodología de ensayo error, ya que no se tienen datos precisos de evapotranspiración potencial para el periodo seco y húmedo como si se tienen para condiciones normales.

Tabla 24. Valores de ETP para el año Seco 2014

Datos	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
ETR	37,7	22,2	124,4	135,8	154,7	4,6	36,1	64,6	120,7	123,0	137,0	40,0	1000,8
P	62,5	36,9	206,5	225,4	256,6	7,6	59,8	107,1	200,2	204,2	227,4	66,3	1660,5
ETP	48,0	30,0	162,0	176,0	202,0	40,0	47,0	84,0	157,0	160,0	178,0	52,0	1336,0

Fuente: Autor

Tabla 26. Valores de ETP para el año Seco 2015

Datos	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
ETR	13,5	79,2	131,4	191,9	91,6	43,0	43,1	23,9	43,2	166,9	181,4	7,2	1016,1
P	22,3	131,5	218,0	318,3	151,9	71,3	71,5	39,6	71,6	277,0	301,0	12,0	1686,0
ETP	20,0	103,0	170,0	248,0	119,0	56,0	56,0	30,0	57,0	216,0	235,0	11,0	1321,0

Fuente: Autor

Tabla 25. Valores de ETP para el año Húmedo 2010

Datos	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
ETR	49,6	75,7	74,1	79,0	62,7	121,8	37,4	78,6	169,3	123,7	36,9	52,9	961,7
P	90,3	137,8	135,0	143,8	114,2	221,8	68,1	143,1	308,3	225,2	67,2	96,3	1751,0
ETP	61,0	94,0	92,0	98,0	77,0	150,0	46,0	97,0	210,0	153,0	45,0	65,0	1188,0

Fuente: Autor

Tabla 27. Valores de ETP para el año Húmedo 2011

Datos	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ANUAL
ETR	23,8	103,4	88,6	92,9	137,7	19,6	56,0	42,3	50,4	343,6	142,1	88,6	1189,0
P	33,2	144,1	123,4	129,5	192,0	27,3	78,1	59,0	70,2	478,9	198,1	123,4	1657,2
ETP	34,0	155,0	132,0	137,0	206,0	30,0	86,0	65,0	75,0	510,0	214,0	131,0	1775,0

Fuente: Autor

4.2.1.5 Determinación de la escorrentía

Esta variable se calculó mediante la ecuación descrita dentro de los parámetros del balance hídrico agrícola, donde se deben tener en cuenta los valores de precipitación media y ETR ya calculados.

Reemplazando los valores en la siguiente ecuación se obtiene:

$$\text{Esc} = \text{Precipitación media} - \text{ETR}$$

$$\text{Esc} = 1640,0 - 966,7$$

$$\text{Esc} = 637,3$$

4.2.1.6 Determinación del coeficiente de escorrentía K_e

Remplazando en la ecuación se obtiene lo siguiente se obtiene:

$$K_e = 1 - \frac{Esc}{P}$$
$$K_e = 1 - \frac{637,3}{1640,0}$$
$$K_e = 0,60$$

A partir de lo estipulado por *Suarez Castro en 1979*, el coeficiente “ K_e ” para terrenos ondulados con cultivos limpios como aquel en donde se encuentra el cultivo de café estudiado es de 0,60 (Suarez Castro, 1979) como se puede observar en la tabla 28, lo cual indica que el cálculo realizado es correcto.

Tabla 28. Valores de K_e

Clase de vertiente	Valor del coeficiente de escorrentía (C)
Ondulada (5 a 10% de pendiente)	
Con cultivo limpio	0,60
Con pastos	0,36
Con bosques	0,18
Montañosa (10 a 30% de pendiente)	
Con cultivo limpio	0,72
Con pastos	0,42
Con bosques	0,21

Fuente: (Suarez Castro, 1979)

4.2.1.7 Determinación del coeficiente de cultivo K_c

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) es la entidad encargada de reportar los diferentes coeficientes de cultivo que existen; para el caso del café, el valor de K_c para su etapa inicial es de 0,9, para la etapa de medios de temporada es 0,95 y para el término de la etapa es de 0,9 nuevamente según lo reportado en la “*Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (FAO, 2006)”.

4.2.1.8 Determinación del rendimiento de cultivo

El rendimiento del cultivo de café en condiciones normales es de aproximadamente 12 cargas por hectárea cultivada. Para la cuantificación de huella hídrica es necesario calcular el rendimiento en toneladas por hectárea. Por lo tanto, se calcula teniendo en cuenta:

$$1 \text{ carga} = 125 \text{ kg}$$

$$1 \text{ Ton} = 1000 \text{ kg}$$

Reemplazando valores en la ecuación se obtiene:

$$Y = \frac{(12 \text{ cargas} * 125 \text{ kg})}{1000 \text{ kg}} * 1 \text{ Ton}$$

$$Y = 1,5 \text{ Ton/ha.}$$

4.2.1.9 Cálculo de la huella hídrica verde

Para un cultivo de café, la primera cosecha requiere aproximadamente un año y medio el cual se encuentra dividido en 2 fases: la primera corresponde al desarrollo de la semilla y la segunda corresponde al crecimiento de la planta. A partir de lo anterior, el cálculo de la huella hídrica se realizó para cada una de estas fases con el fin de obtener un valor más específico según las condiciones climáticas normales, secas y de humedad.

- Condiciones NORMALES

Se rempazan los valores correspondientes a las condiciones normales del cultivo en las ecuaciones descritas en el literal 3.2 para la fase de semillero y almácigo y la fase de cosecha.

Tabla 30. Balance Hídrico Agrícola en condiciones normales para la fase de Semillero y Almacigo

CONDICIONES NORMALES							
VARIABLES	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
ETP (mm)	86,4	91,3	98,3	91,4	100,2	92,1	98,1
Kc	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
U.C	77,8	82,1	88,5	82,3	90,2	82,9	88,3
Precipitación (mm)	195,8	76,1	40,5	86,6	138,4	208,3	163,8
Ke	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Precipitación Efectiva (mm)	117,5	45,7	24,3	52,0	83,0	125,0	98,3
Riego Bruto (mm)	36,5	64,2	30,3	7,1	7,1	0,0	0,0
Kr	1	1	1	1	1	1	1
Efectividad de riego (mm)	36,5	64,2	30,3	7,1	7,1	0,0	0,0

Fuente: Autor

Tabla 29. Balance Hídrico Agrícola en condiciones normales para la fase de Cosecha

CONDICIONES NORMALES												
VARIABLES	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
ETP (mm)	90,8	86,4	91,3	98,1	93,1	86,4	91,3	98,3	91,4	100,2	92,1	98,1
Kc	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
U.C	86,2	82,1	86,7	93,2	88,5	82,1	86,7	93,4	86,8	95,2	87,5	93,2
Precipitación (mm)	94,7	69,2	87,3	147,1	296,2	195,8	76,1	40,5	86,6	138,4	208,3	163,8
Ke	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Precipitación Efectiva (mm)	56,8	41,5	52,4	88,2	177,7	117,5	45,7	24,3	52,0	83,0	125,0	98,3
Riego Bruto (mm)	29,4	40,6	34,3	5,0	0,0	0,0	30,4	16,2	34,7	55,4	83,3	65,5
Kr	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Efectividad de riego (mm)	29,4	40,6	34,3	5,0	0,0	0,0	30,4	16,2	34,7	55,4	83,3	65,5

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta los parámetros correspondientes a este periodo y la ecuación de precipitación efectiva derivada del balance hídrico agrícola se calcula el agua verde en m³/ha. para la fase de semillero y almacigo (noviembre – mayo) y la fase de cosecha (junio – mayo).

Reemplazando los valores para el mes de noviembre en condiciones normales, la precipitación efectiva es igual a:

$$P_{\text{efc}} = P * K_e$$

$$P_{\text{efc}} = 195,8 * 0,60$$

$$P_{\text{efc}} = 117,5 \text{ mm}$$

Este procedimiento se realiza para cada uno de los meses tanto en la primera fase como en la segunda.

Tomando en consideración que la precipitación efectiva corresponde al agua verde consumida por un cultivo; a partir de los resultados obtenidos en el balance hídrico agrícola correspondientes a esta variable, se calcula su valor en m³/ha. Para ello se debe tener en cuenta:

$$1\text{mm} = \frac{1\text{L}}{\text{m}^2}$$

$$1 \text{ m}^3 = 1.000 \text{ L}$$

$$1 \text{ ha} = 10.000 \text{ m}^2$$

A partir de lo anterior, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 31. Valores mensuales de Agua Verde en la fase de semillero y almácigo para condiciones normales

CONDICIONES NORMALES							
Mes	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
A.verde (m³/ha)	1174,7	456,7	243,3	519,8	830,4	1249,9	982,7

Fuente: Autor

Teniendo el agua verde para cada mes, el valor de huella hídrica en la fase de semillero y almácigo corresponde a:

$$HH_{\text{verde}} = \sum \text{A. verde m}^3/\text{ha}$$

$$HH_{\text{verde}} = 5275,5 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Tabla 32. Valores mensuales de Agua Verde en la fase Cosecha para condiciones normales

Mes	jun	jul	agost	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
A.Verde (m³/ha)	568,4	415,3	523,6	882,4	1777,0	1174,7	456,7	243,3	519,8	830,4	1249,9	982,7

Fuente: Autor

El valor de huella hídrica en la fase de cosecha corresponde a:

$$HH_{\text{verde}} = \sum A. \text{verde } m^3/\text{ha}$$

$$HH_{\text{verde}} = 9624,1 \text{ m}^3/\text{ha}$$

El cálculo final de huella hídrica para condiciones normales corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$HH_{\text{verde}} = 5275,5 \text{ m}^3/\text{ha} + 9624,1 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$HH_{\text{verde}} = 14899,6 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Al igual que para las condiciones normales, se remplazan los valores correspondientes a los periodos secos (2014 – 2015) y húmedos (2010 – 2011) para la fase de semillero y almácigo y la fase de cosecha, obteniendo como resultado la huella hídrica verde total para casa una.

- Condiciones SECAS

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2014 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$HH_{\text{verde}} = 6489,1 \text{ m}^3/\text{ha} + 9962,7 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$HH_{\text{verde}} = 16451,8 \text{ m}^3/\text{ha}$$

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2015 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$HH_{\text{verde}} = 6930,0 \text{ m}^3/\text{ha} + 10115,8 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$\mathbf{HH_{\text{verde}} = 17045,8 \text{ m}^3/\text{ha}}$$

- Condiciones HÚMDAS

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2010 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$HH_{\text{verde}} = 4707,1 \text{ m}^3/\text{ha} + 10505,9 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$\mathbf{HH_{\text{verde}} = 15213,0 \text{ m}^3/\text{ha}}$$

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2011 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$HH_{\text{verde}} = 5662,1 \text{ m}^3/\text{ha} + 9942,9 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$\mathbf{HH_{\text{verde}} = 15605,0 \text{ m}^3/\text{ha}}$$

Adicional a lo anterior, se decide calcular la huella hídrica verde por Kg de producto para las 3 condiciones climáticas evaluadas, con el fin de tener un estimado más cercano a la realidad y determinar la demanda requerida en dichos periodos.

Reemplazando los valores correspondientes se halla lo siguiente:

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{HH_{\text{verde}}}{Y}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{14899,6 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{1,5 \frac{\text{Ton}}{\text{ha}}} = 9933,0 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = 9933,0 \frac{\text{m}^3}{\text{Ton}} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} = 9,93 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

A partir de lo anterior, un cultivo consume 9,93 m³ de agua verde en condiciones climáticas normales para producir 1 kg de café.

- **Condiciones SECAS**

Reemplazando los valores correspondientes se halla lo siguiente:

Para el año 2014:

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{HH_{\text{verde}}}{Y}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{16451,8 \frac{m^3}{ha}}{1,5 \frac{Ton}{ha}} = 10967,9 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = 10967,9 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000kg} = 11,0 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

A partir de lo anterior, se requieren 11 m³ de agua verde para producir 1 kg de café en un año seco como el 2014.

Para el año 2015:

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{HH_{\text{verde}}}{Y}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{17045,8 \frac{m^3}{ha}}{1,5 \frac{Ton}{ha}} = 11363,9 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = 11363,9 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000kg} = 11,4 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Un cultivo de café estudiado consume aproximadamente 11,4 m³ de agua verde en condiciones climáticas secas para producir 1 kg de café en el 2015.

- **Condiciones HÚMEDAS**

Reemplazando los valores correspondientes se halla lo siguiente:

Para el año 2010:

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{HH_{\text{verde}}}{Y}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{15213,0 \frac{m^3}{ha}}{1,5 \frac{Ton}{ha}} = 10142 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = 10142 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000kg} = 10,1 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

A partir de lo anterior, se requieren 10,1 m³ de agua verde para producir 1 kg de café en un año seco como el 2010.

Para el año 2011:

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{HH_{\text{verde}}}{Y}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = \frac{15605,0 \frac{m^3}{ha}}{1,5 \frac{Ton}{ha}} = 10403,3 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{verde producto}} = 10403,3 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000kg} = 10,4 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Se requieren 10,4 m³ de agua verde en condiciones climáticas secas para producir 1 kg de café en el 2011.

4.2.1.10 Cálculo de la huella hídrica Azul

El café es un cultivo que necesita poco riego durante su etapa de crecimiento, ya que puede ser productivo con solo el agua lluvia que reciba en dicha etapa. Según lo observado en visita de campo, en su mayoría los cultivos presentes en la microcuenca del río Sunuba no utilizan agua para regar las hectáreas plantadas de este fruto y

tampoco cuenta con ningún sistema de riego hasta el momento. Por lo tanto el valor de la huella hídrica azul real para las tres condiciones climáticas evaluadas en la etapa de Cosecha corresponde a cero (0).

Con respecto a la etapa de semillero y almácigo si se requiere utilizar agua azul para regar el café durante este periodo. Por lo tanto, la huella hídrica azul corresponde al cálculo del riego efectivo obtenido en el balance hídrico agrícola para las 3 condiciones climáticas estudiadas en esta etapa.

- Condiciones NORMALES

Tabla 33. Valores mensuales de Agua Azul en la fase de Semillero y Almácigo

Mes	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
A.Azul (m3/ha)	364,7	641,6	302,9	71,2	71,2	0,0	0,0

Fuente: Autor

El valor de huella hídrica en la fase de semillero y almácigo para condiciones normales corresponde a:

$$HH_{\text{azul}} = \sum A. \text{ azul } m^3/ha$$

$$HH_{\text{azul}} = 1547,5 m^3/ha$$

- Condiciones SECAS

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2014 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$HH_{\text{azul}} = 1142,9 m^3/ha + 0$$

$$HH_{\text{azul}} = 1142,9 m^3/ha$$

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2015 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$HH_{\text{azul}} = 1224,0 m^3/ha + 0$$

$$HH_{\text{azul}} = 1224,0 m^3/ha$$

- Condiciones HÚMEDAS

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2010 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$\begin{aligned} HH_{\text{azul}} &= 80,9 \text{ m}^3/\text{ha} + 0 \\ \mathbf{HH_{\text{azul}} &= 80,9 \text{ m}^3/\text{ha}} \end{aligned}$$

El cálculo final de huella hídrica para condiciones secas del año 2011 corresponde a la suma de los valores obtenidos en ambas fases, es decir:

$$\begin{aligned} HH_{\text{azul}} &= 3418,9 \text{ m}^3/\text{ha} + 0 \\ \mathbf{HH_{\text{azul}} &= 3418,9 \text{ m}^3/\text{ha}} \end{aligned}$$

-

En este caso también se calcula el consumo de agua azul por Kg de café para los 3 periodos:

- *Condiciones SECAS*

Para el año 2014:

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{HH_{\text{azul}}}{Y}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{1142,9 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{1,5 \frac{\text{Ton}}{\text{ha}}} = 761,9 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = 761,9 \frac{\text{m}^3}{\text{Ton}} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} = 0,762 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

A partir de lo anterior, se requieren 0,762 m³ de agua azul para producir 1 kg de café en un año seco como el 2014.

Para el año 2015:

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{HH_{\text{azul}}}{Y}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{1224,0 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{1,5 \frac{\text{Ton}}{\text{ha}}} = 1,5 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{Ton}} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} = 0,0015 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Se requieren 0,0015 m³ de agua azul en condiciones climáticas secas para producir 1 kg de café en el 2015.

- **Condiciones HÚMEDAS**

Para el año 2010:

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{HH_{\text{azul}}}{Y}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{80,9 \frac{m^3}{ha}}{1,5 \frac{Ton}{ha}} = 53,9 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = 53,9 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000kg} = 0,053 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Se requieren 0,053 m³ de agua verde para producir 1 kg de café en un año seco como el 2010.

Para el año 2011:

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{HH_{\text{azul}}}{Y}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = \frac{3418,9 \frac{m^3}{ha}}{1,5 \frac{Ton}{ha}} = 2779,2 \text{ m}^3/\text{Ton}$$

$$HH_{\text{azul producto}} = 2779,2 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000kg} = 2,27 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Un cultivo de café requiere 2,27 m³ de agua azul en condiciones climáticas secas para producir 1 kg de café en el 2011.

El componente de agua azul para el proceso de lavado de café se calcula mediante un estimado promedio, donde por cada cosecha (12 cargas/ha), las cuales equivales a 1,5 Ton/ha. se utilizan aproximadamente para las 3 veces de lavado 6000L. Por tanto, se calcula la huella hídrica azul en m³/kg

$$Y = 1,5 \text{ Ton/ha.}$$

$$A_{\text{azul}} = 6 \text{ m}^3/\text{ha.}$$

$$HH_{\text{azul lavado}} = \frac{6 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{1,5 \frac{\text{Ton}}{\text{ha}}}$$

$$HH_{\text{azul lavado}} = 4 \text{ m}^3/\text{Ton} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}}$$

4.2.1.11 Cálculo de la huella hídrica Gris

Actualmente la Flor de Azufre es uno de los fertilizantes más utilizados en el cultivo de café es, ya que según la Federación Nacional de cafeteros de Colombia, los suelos con características de permeabilidad y carga orgánica como las que presenta la tierra en esta microcuenca únicamente necesitan este tipo de componente, pues el resto son estables. La composición de dicho fertilizante es 99% azufre (Monómeros S.A, 2008). Por lo tanto, para calcular el volumen total de agua que se necesita para asimilar una tonelada de contaminante crítico se debe tener en cuenta el exceso de este, el cual va a llegar a los cuerpos hídricos superficiales y subterráneos por medio de la lixiviación, basado en lo descrito por Rodríguez (2011) en su trabajo de grado sobre huella hídrica.

El azufre es un elemento poco estudiado con respecto a su aplicabilidad como fertilizante, por lo que no se encontró información referente al porcentaje que se pierde de este en la lixiviación. Por tanto, se optó por tomar como referencia lo dicho por Chapagain et al. (2006), citado por Rodríguez (2011) donde se afirma que para fertilizantes frecuentemente utilizados, los cuales en su mayoría se componen de Nitrógeno, el porcentaje de pérdida corresponde al 10% (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). Con respecto al valor máximo de azufre en el agua según la Organización Mundial de la Salud, no puede superar los 200 mg/L (OMS, 2006). En cuanto a la concentración natural de este elemento, según lo descrito en la “*Guía para la calidad del agua potable*” no se tiene un valor específico registrado, sin embargo, el azufre al entrar en contacto con el agua se transforma en sulfatos y si el cuerpo de agua no tiene una buena demanda de oxígeno, rápidamente puede convertirse en sulfuro, los cuales tienen una concentración mínima de 0,15 mg/L, valor que se tomara como referencia en este caso teniendo en cuenta que se está estudiando un agua contaminada (OMS, 2006).

La cantidad de fertilizante utilizado en un cultivo de café promedio es de 150 kg por hectárea cultivada (5000 plantas), siendo aplicados aproximadamente 3 bultos de flor

de Azufre de 50 kg 2 veces al año (periodo de cosecha), con un promedio de 30 g por planta.

A partir de lo anterior y reemplazando valores en la siguiente ecuación, el cálculo de la huella hídrica corresponde a:

$$HH_{gris} = \frac{(\alpha * AR) / (Cmx - Cn)}{Y}$$

$$HH_{gris} = \frac{(0,15 * 150 \frac{kg}{ha}) / (0,2 \frac{kg}{m^3} - 0,0001 \frac{kg}{m^3})}{1,5 \frac{Ton}{m^3}}$$

$$HH_{gris} = 75 \text{ m}^3/\text{Ton} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$HH_{gris} = 0,075 \text{ m}^3/\text{kg}$$

4.2.1.12 Cálculo de la huella hídrica TOTAL

- Condiciones NORMALES

Teniendo las tres huellas halladas (HH_{verde} , HH_{azul} , HH_{gris}) se calcula la HH_{total} :

$$\begin{aligned} HH_{Total} &= HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris} \\ HH_{Total} &= 9,93 \text{ m}^3/\text{kg} + 1,031 \text{ m}^3/\text{kg} + 0,075 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \mathbf{HH_{total} &= 11,036 \text{ m}^3/\text{kg}} \end{aligned}$$

Se requieren 11,036 m³ de agua para producir 1 kg de café en condiciones normales

- Condiciones SECAS

Para el año 2014

$$\begin{aligned} HH_{Total} &= HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris} \\ HH_{Total} &= 11,0 \text{ m}^3/\text{kg} + 0,762 \text{ m}^3/\text{kg} + 0,075 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \mathbf{HH_{total} &= 11,837 \text{ m}^3/\text{kg}} \end{aligned}$$

Se requieren 11,837 m³ de agua para producir 1 kg de café en condiciones de sequía en el año 2014

Para el año 2015

$$\begin{aligned} HH_{\text{Total}} &= HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}} \\ HH_{\text{Total}} &= 11,4 \text{ m}^3 / \text{kg} + 0,0015 \text{ m}^3 / \text{kg} + 0,075 \text{ m}^3 / \text{kg} \\ \mathbf{HH_{\text{total}} &= 11,476 \text{ m}^3 / \text{kg}} \end{aligned}$$

Se requieren 11,476 m³ de agua para producir un kg de café en el año 2015, siendo este uno de los más secos de los últimos tiempos.

- Condiciones HÚMEDAS

Para el año 2010

$$\begin{aligned} HH_{\text{Total}} &= HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}} \\ HH_{\text{Total}} &= 10,1 \text{ m}^3 / \text{kg} + 0,053 \text{ m}^3 / \text{kg} + 0,075 \text{ m}^3 / \text{kg} \\ \mathbf{HH_{\text{total}} &= 10,228 \text{ m}^3 / \text{kg}} \end{aligned}$$

Se requieren 10,228 m³ de agua para producir 1 kg de café en la ola invernal del año 2010

Para el año 2011

$$\begin{aligned} HH_{\text{Total}} &= HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}} \\ HH_{\text{Total}} &= 10,4 \text{ m}^3 / \text{kg} + 2,27 \text{ m}^3 / \text{kg} + 0,075 \text{ m}^3 / \text{kg} \\ \mathbf{HH_{\text{total}} &= 12,745 \text{ m}^3 / \text{kg}} \end{aligned}$$

Se requieren 12,745 m³ de agua para producir un kg de café en condiciones de humedad para el año 2011.

A partir de los cálculos realizados con anterioridad, se obtiene como resultado final 3 huellas hídricas

Tabla 34. Huellas Hídricas Totales

HUELLA HÍDRICA SECTOR AGRÍCOLA				
CONDICIONES NORMALES	CONDICIONES SECAS		CONDICIONES HÚMEDAS	
	AÑO 2014	AÑO 2015	AÑO 2010	AÑO 2011
HHtotal = 11,036 m ³ /kg	HHtotal = 11,837 m ³ /kg	HHtotal = 11,476 m ³ /kg	HHtotal = 10,228 m ³ /kg	HHtotal = 12,745 m ³ /kg

Fuente: Autor

4.2.2 Sector Doméstico

Con respecto al sector doméstico, hasta la fecha se cuenta con la legalización de 6 acueductos concesionados, los cuales suministran agua potable tanto a la población rural como urbana del municipio de Guayatá, los cuales captan el recurso de las diferentes corrientes superficiales con las que cuenta la microcuenca de estudio.

Tabla 35. Consumo de Agua sector Doméstico

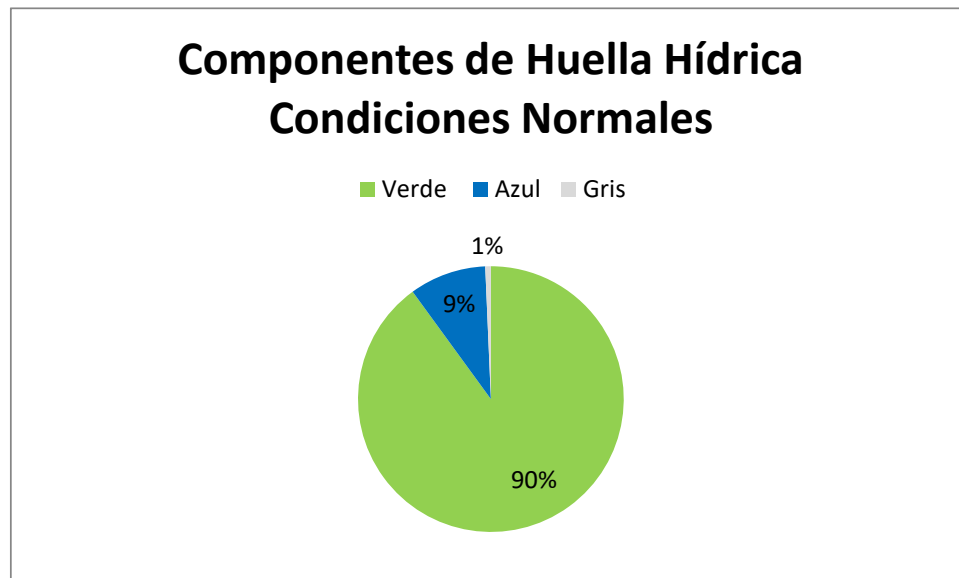
FID	ACUEDUCTO	CA	FUENTE
803	Asociación Sochaquira abajo	071-06	A. SUBT
479	Asociación USUARIOS MINI DISTRITO DE RIEGO SOCHEQUIRA	028-13	Superficial Q. Sochaquira
777	Asociación suscriptores acueducto quebrada tencua	013-14	Superficial
686	EMSOGUAYATA	004-08	Superficial Q. San Cayetano
687	EMSOGUAYATA	004-09	Superficial Q. san Cayetano
804	Acueducto San Luis Rincón abajo	094-06	Subterránea

Fuente: Autor

4.3 ESTRATEGIAS DE MEJORA

4.3.1 Sector Agrícola

Gráfico 6. Huella hídrica obtenida



Fuente: Autor

El componente de huella verde en condiciones normales representa el 90% del cálculo total de la huella hídrica (ver gráfico 6) teniendo un impacto importante en el sistema productivo, ya que se pueden estar generando tanto pérdidas de agua en el suelo como déficit en la disponibilidad de agua verde del ecosistema, lo cual implicaría que más adelante que el rendimiento del cultivo disminuya y la producción se vea afectada. Es importante resaltar que en épocas donde las condiciones sean secas, al aumentar la radiación solar y la temperatura, el consumo de agua verde aumenta. Por lo anterior, se deben implementar alternativas que aumenten la capacidad de retención de agua del suelo y mejoren la su capacidad de infiltración para aumentar la disponibilidad de agua verde:

- **Sombrío:** consiste específicamente en sembrar especies arbóreas en el área cultivada de café, las cuales además de dar sombra al cafeto funcionan como protectores del suelo, pues le aportan materia orgánica y nutrimentos al mismo (Federación nacional de Cafeteros de Colombia, 2010). Una de las especies más usadas para esto es el plátano.

- **Adecuación del terreno:** construcción de desagües naturales, zanjillas de absorción, zanjillas de desagüe, acequias de ladera, canales de desviación, uso de barreras vivas, siembras en contorno, barreras muertas, incorporación de materia orgánica, cultivos intercalados o asociados al café, establecimiento de coberturas, amarres de fuentes de agua y diques de gaviones, con el fin de mejorar las condiciones del suelo y su capacidad de retener el recurso (Federación nacional de Cafeteros de Colombia, 2010).
- **Actividades de conservación:** consisten en dar protección integral a las cuencas y micro cuencas que abastecen de agua a las comunidades mediante reforestaciones, planes de saneamiento ambiental e implementación del sistema del beneficio ecológico y el manejo de subproductos (Federación nacional de Cafeteros de Colombia, 2010).

Otro de los componentes que tiene un fuerte impacto en el proceso productivo del café es el agua azul utilizada en la etapa de lavado, con un valor de 4 m³/Ton producida. Para reducir dicho consumo, algunas de las alternativas sostenibles son:

- **Recirculación del agua:** consiste en recircular el agua del despulpado y lavado al proceso productivo nuevamente, disminuyendo el volumen de agua, acelerando los procesos de fermentación y facilitando el posterior proceso de tratamiento de las aguas mieles generadas (ANACAFÉ, 2015).
- **Riego por goteo:** Para la Federación Nacional de Cafeteros, la aplicación controlada y localizada del agua de riego a través de los emisores de goteo, humedece solamente una parte del volumen del suelo, denominada bulbo húmedo (zona radicular activa que contiene más del 90% de las raíces absorbentes), permitiendo un ambiente ideal para la absorción de agua; además, el aporte de agua de riego controlado, evita las pérdidas por percolación profunda y las generadas por escorrentía superficial en zonas pendientes altas, muy frecuentes en la mayoría de zonas agrícolas dedicadas al cultivo de café (Federación nacional de Cafeteros de Colombia, 2010).
- **Motobombas Sumergibles:** son motobombas de baja potencia diseñadas para trabajar sumergidas en agua, las cuales se usan para mover el recurso dentro de peceras o en pequeñas fuentes; se componen de una válvula de flotador de sanitario que mantiene constante el nivel y que regula la entrada de agua al recipiente correspondiente al lavado, y una motobomba de pecera que extrae agua del recipiente y la lleva hasta las entradas del desmucilagador que se esté utilizando. Esta tecnología permite disminuir el caudal y suministrar de manera exacta el agua suficiente, teniendo pérdidas del 0% durante el proceso (Federación nacional de Cafeteros de Colombia, 2010).

Con respecto al agua gris calculada, aunque es la huella con menor valor, es importante tener en cuenta cómo deben tratarse las aguas residuales del proceso antes de ser vertidas a los cuerpos superficiales de la microcuenca, con el fin de disminuir dicho resultado a 0:

- **Beneficio del café en Seco:** Actualmente se está optando por realizar las actividades de remoción del mucilago sin el uso del agua, este proceso consiste en depositar en la tolva de la despulpadora el café recién recolectado, y después de un proceso de fricción entre los mismos granos, desaparece la miel que va adherida a la almendra, donde el uso del agua se reduce a menos de 0,7 litros por cada Kg de café (Federación nacional de Cafeteros de Colombia, 2010).
- **Subproductos:** por medio de procesos de fermentación, tanto las aguas mieles como el deserezado pueden convertirse en biofertilizantes para el mismo proceso de cosecha del café.

4.3.2 Sector Doméstico

Se recomienda legalizar los caudales puntuales que la actualidad se encuentra campando el recurso de manera irregular para cuantificar el consumo de manera más eficiente.

5 CONCLUSIONES

Las metodologías más apropiadas para el cálculo de la huella hídrica total fueron la “Guía de lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua ERA – 2013” desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y “*The water footprint assessment manual*” desarrollado por la UNESCO, bajo la dirección del profesor Hoekstra.

La huella hídrica total para producir un kilogramo de café en condiciones climáticas normales fue de 11,06 m³/ kg, con porcentaje de agua verde correspondiente al 90%, agua azul al 9% y agua gris al 1%. Correspondiente al sector agrícola del área de estudio.

El componente de huella hídrica verde fue aquel que generó más impacto en el cálculo de la huella hídrica total, con un valor de 9,93 m³/ kg y que el sector agrícola de la región se caracteriza por ser de tipo seco, es decir, que no es irrigado durante el tiempo de cosecha, únicamente depende del agua captada por el suelo derivada de las precipitaciones.

Para condiciones de tiempo seco es posible que los valores de huella hídrica aumenten considerablemente, ya que el componente de agua verde es el más grande.

BIBLIOGRAFÍA

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard*. Washington DC: Earthscan Ltd. publishes in association with the International Institute for Environment and Development.
- University of Twente; WWF; UNESCO-IHE; World Business Council for Sustainable Development; International Finance Corporation; Netherlands Water Partnership; Water Neutral Foundation. (2015). *Aims & history*. Recuperado el 9 de Febrero de 2016, de Water Footprint Network: <http://waterfootprint.org/en/about-us/aims-history/>
- A.Y. Hoekstra, A. C. (2004). *Water footprints of nations. Volume 1: Main Report*. Netherlands: UNESCO-IHE Delft.
- Amaya, F. A. (2001). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Guayatá: Alcaldía de Guayatá.
- ANACAFÉ. (2015). *Asociación Nacional del Café de Guatemala*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de Uso eficiente del agua en el beneficio húmedo del café: https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Uso_eficiente_agua_BeneficioHumedo
- Arcos, S. I. (2012). Evaluación y análisis de la huella hídrica y agua virtual de la producción agrícola en el Ecuador . *Escuela Agrícola Panamericana*, 6- 55.
- Arévalo, D., & Sabogal, J. L. (2011). Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola . *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 103 - 123.
- Beltran, H. A. (2013). *Adaptación de la metodología general de huella hídrica al cultivo de rosa. Estudio de caso el Rosal, Cundinamarca (Colombia)*. Bogotá DC: Universidad El Bosque .
- Budyko, M. I. (1974). *Climate and Life*. Nueva York: Academic Press.
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia CTA, COSUDE . (2013). *Resumen de Resultados: Evaluación de la Huella Hídrica de la Cuenca del Río Porce* . Medellín : WWF.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* . Roma : Dirección de la FAO .
- Federación nacional de Cafeteros de Colombia. (2010). *Guía Ambiental para el Sector Cafetero* (segunda edición ed.). Bogotá DC: Gerencia Federación nacional de cafeteros de Colombia.
- Feng, K., Hubacek, K., Minx, J., Siu, Y. L., Chapagain, A., Yu, Y., & Barrett, D. G. (2011). Spatially Explicit Analysis of Water Footprints in the UK. *Water*, 47-63.

- Flores, J. L., Moreno, M. T., Franco, R. C., Moreno, M. A., & Torres, J. R. (2014). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 93-107.
- Herrán García, M., Nelson, M. V., Dario, L. S., Karina, P. C., Consuelo, E. O., Adriana, V. G., . . . Pilar, G. G. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional de Agua - ERA*. Bogotá DC: Comité de comunicaciones y publicaciones del IDEAM.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua* . Bogotá, DC: Ministerio de Medio Ambiente.
- IDEAM. (2014). *IDEAM*. Recuperado el 11 de Agosto de 2016, de Solicitud de la Información: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>
- ISO. (2014). *ISO 14046: Gestion Ambiental, Huella Hídrica, principios, requisitos y directrices*. Ginebra: Comision Electronica Internacional .
- MAVDT. (2010). *Politica Nacional para la gestion integral del recurso hidrico*. Bogotá D.C.: Viceministerio de Ambiente.
- Ministerio del Medio Ambiente . (1997). *Pólítica Nacional de Producción mas Limpia* . Bogota D.C.
- Monómeros S.A. (2008). *Hoja de Datos de Seguridad del material: Azufre*. Barranquilla: Gerencia de Seguridad Industrial y Responsabilidad Integra de Monómeros Colombo Venezolanos S.A.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable* . Suiza: Ediciones de la Organización Mundial de la Salud.
- Roberto Rodríguez Casado, Alberto Garrido Colmenero, Manuel Ramón Llamas Madurga, & Consuelo Varela Ortega. (2008). LA HUELLA HIDROLÓGICA DE LA AGRICULTURA ESPAÑOLA. *Papeles de Agua Virtual*, 6 - 32.
- Rodríguez, Y. M. (2011). *Cuantificación de Huella Hídrica en el cultivo de papa (Solanum Tubersum sp. andigena) Variedad pastusa suprema: Estudio de caso municipio Carmen de Carupa* . Bogotá DC: Universidad El Bosque .
- Suarez Castro, F. (1979). *Conservación de suelos: estudio internacional numero 4* . San José, Costa Rica : Instituto iberoamericano de Ciencias Agrícolas.
- Zambrano, M. A. (2012). *Plan de Desarrollo 2012 - 2015*. Guayatá: Alcaldía municipal de Guayatá.